

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Starešinič, M., 2015. Uporaba in integracija komponent BIM Tekla Structures za izračun jeklenih spojev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Sinur, F., somentor Cerovšek, T.): 89 str.

Datum arhiviranja: 21-07-2015

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Starešinič, M., 2015. Uporaba in integracija komponent BIM Tekla Structures za izračun jeklenih spojev. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Sinur, F., co-supervisor Cerovšek, T.): 89 p.

Archiving Date: 21-07-2015

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*

Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GRADBENIŠTVO  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

**MARKO STAREŠINIČ**

**UPORABA IN INTEGRACIJA KOMPONENT BIM  
TEKLA STRUCTURES ZA IZRAČUN JEKLENIH  
SPOJEV**

Diplomska naloga št.: 3444/KS

**THE USE AND INTEGRATION OF TEKLA  
STRUCTURES COMPONENTS FOR STEEL  
CONNECTIONS' CALCULATIONS**

Graduation thesis No.: 3444/KS

**Mentor:**  
doc. dr. Franc Sinur

**Predsednik komisije:**  
izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**  
doc. dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 24. 06. 2015

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVE**

Podpisan Marko Starešinič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »Uporaba in integracija komponent BIM Tekla Structures za izračun jeklenih spojev«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 10. 6. 2015

Marko Starešinič

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>004.2:624.04(497.4)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Marko Starešinič</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Franc Sinur</b>
<b>Somentor:</b>	<b>doc. dr. Tomo Cerovšek</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Uporaba in integracija komponent BIM Tekla Structures za izračun jeklenih spojev</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>89 str., 4 pregl., 50 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>dimenzioniranje jeklenih spojev, datoteke Excel z makroji za kontrolo jeklenih spojev, modeliranje BIM, Tekla Structures komponente</b>

### **Izvleček**

V okviru diplomske naloge smo izdelali v povezavi z modelirnikom Tekla Structures makroje Excel, s katerimi lahko poračunamo momentni spoj s čelno pločevino, členkast spoj z vezno pločevino in priključek nateznega elementa. Makroji se uporabljajo na osnovi komponent Tekla Structures, kjer uporabnik naredi model konstrukcije in avtomatično izdela spoje, izvozi vhodne podatke s pomočjo orodja `ComponentVariableImporter` v datoteko Excel in opravi dimenzioniranje spoja. Poleg tega smo opisali teoretično ozadje dimenzioniranja spojev, predstavili modeliranje BIM in zgradbo makrojev ter prikazali delovanje makrojev na dejanskih primerih. Za vsak spoj posebej smo prikazali celotni izračun, ki ga makro izvede avtomatično. Upoštevali smo tudi dodatne obremenitve, ki izhajajo iz dejanske postavitve spojev na konstrukciji; ts. povečana obremenitev v stebru, prečki in spoju.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 004.2:624.04(497.4)(043.2)  
**Author:** Marko Starešinič  
**Supervisor:** assist. prof. Franc Sinur, Ph.D  
**Co-advisor:** assist. prof. Tomo Cerovšek, Ph.D  
**Title:** The use and integration of Tekla Structures components for steel connections' calculations  
**Document type:** Graduation Thesis – University studies  
**Notes:** 89 p., 4 tab., 50 fig.  
**Key words:** design of steel connections, Excel Macro files for design check, BIM modeling, Tekla Structures components

**Abstract**

The main objective of this graduation thesis is the development of Tekla Structures integrated Excel Macro files, which allow for design of steel connections: moment connection with end plate, pinned connection with fin plate and bracing connection. After building a model of a steel structures and applying components for steel connections in Tekla Structures, a user can export component data from Tekla Structures to Excel Macro using a `ComponentVariableImporter` tool. Excel Macro files enable easy control of connection design. In the theoretical part design of steel joints, BIM modeling, structure of macros and their usage with some examples is presented. The entire calculation, which is made automatically by macros, is also documented. In the examples also the additional forces in column, beam and connection, which appear as a consequence of actual joints configuration on structure, are taken into account.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Francu Sinurju in somentorju doc. dr. Tomu Cerovšku za uspešno vodenje, nasvete in spodbudo pri pisanju diplomskega dela.

Zahvala gre tudi sodelavcem na Katedri za metalne konstrukcije za pomoč in zdravo delovno okolje.

Posebna zahvala gre sošolcem in kolegom iz fakultete, s katerimi smo preživeli lepa študentska leta. Še posebej Tomažu, Matjažu, Gorazdu, Janku, Janezu, Tinetu, Žigi, Benu, Matevžu, Marku, Juretu in Gabrielu. Fantje, bilo je edinstveno.

Zahvaljujem se teti Ani za lektoriranje. Zahvaljujem se tudi vsem, ki so kakorkoli prispevali k nastanku diplomske naloge.

Največja zahvala gre mami, očetu, sestri, starim staršem in Gabrijeli, ki so mi študij omogočili ter nudili brezpogojno podporo in pomoč.

**KAZALO VSEBINE**

<b>IZJAVE</b> .....	<b>II</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK</b> .....	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>ZAHVALA</b> .....	<b>V</b>
<b>1 UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1 Splošno o jeklenih spojih.....	1
1.2 Razporeditev vijakov .....	5
1.3 Zareze v priključenih elementih .....	7
1.4 Avtomatizacija dimenzioniranja spojev .....	8
<b>2 MOMENTNI SPOJ S ČELNO PLOČEVINO</b> .....	<b>9</b>
2.1.1 Natezna cona .....	11
2.1.2 Tlačna cona .....	14
2.1.3 Območje striga .....	14
2.1.4 Postopek projektiranja momentnega spoja.....	15
2.1.4.1 Odpornost posamezne vrste vijakov v natezni coni .....	15
2.1.4.2 Odpornost natezne cone v stojini stebra ali prečke .....	16
2.1.4.3 Odpornost tlačne cone spoja .....	19
2.1.4.4 Strižna nosilnost spoja .....	20
2.1.4.5 Izračun mejne nosilnosti spoja.....	21
2.1.4.6 Dimenzioniranje vijakov na interakcijo strig-upogib .....	22
2.1.4.7 Dimenzioniranje ojačitev v tlačni coni.....	23
2.1.4.8 Dimenzioniranje podložnih pločevin pasnice stebra .....	25
2.1.4.9 Dimenzioniranje dodatne pločevine stojine .....	26
2.1.4.10 Dimenzioniranje diagonalne strižne ojačitve.....	27
2.1.4.11 Dimenzioniranje zvarov .....	28
2.1.4.12 Dimenzioniranje vute .....	30



<b>3 ČLENKAST SPOJ Z VEZNO PLOČEVINO .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.1 Priporočila za geometrijo .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.2 Postopek projektiranja.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1.2.1 Kontrola na strig .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.2.2 Kontrola nosilnosti na bočni pritisk.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.2.3 Strižna in upogibna odpornost vezne pločevine.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.2.4 Stojina nosilca obremenjena z upogibom in strigom.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.2.5 Lokalna stabilnost oslabljenega prereza nosilca zaradi izrezanih delov pasnice.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.2.6 Stabilnost celotnega nosilca na bočno zvrnitev upoštevajoč oslabljene dele pasnice.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.2.7 Podporni element v strigu .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.2.8 Zagotavljanje robustnosti konstrukcije - horizontalne vezi .....</b>	<b>42</b>
<b>4 PRIKLJUČEK DIAGONALNEGA ELEMENTA NA VEZNO PLOČEVINO .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.1 Kotniki .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1.2 Votli profili .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.3 Vezna pločevina .....</b>	<b>47</b>
<b>5 MODELIRANJE BIM.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1 Klasični način projektiranja .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2 Modeliranje BIM.....</b>	<b>51</b>
<b>5.3 Preverba kolizij .....</b>	<b>53</b>
<b>5.4 Knjižnica parametričnih komponent .....</b>	<b>54</b>
<b>5.5 Izvoz spremenljivk v Excel.....</b>	<b>55</b>
<b>6 DATOTEKE EXCEL Z MAKROJI ZA DIMENZIONIRANJE SPOJEV.....</b>	<b>57</b>
<b>6.1 Excelove datoteke .....</b>	<b>57</b>
<b>6.2 Makro zapisan v VBA .....</b>	<b>58</b>
<b>6.3 Makro za dimenzioniranje komponente 11 in prikaz sheme le-tega .....</b>	<b>59</b>
<b>7 PRIMERI UPORABE MAKROJEV .....</b>	<b>62</b>
<b>7.1 Statična analiza konstrukcije.....</b>	<b>62</b>
<b>7.2 Upoštevanje dodatnih vplivov postavitve in oblikovanja spojev .....</b>	<b>64</b>
<b>7.2.1 Kontrola nosilnosti stebra .....</b>	<b>66</b>

---

<b>7.2.1.1 Kontrola kompaktnosti prereza.....</b>	<b>67</b>
<b>7.2.1.2 Kontrola nosilnosti elementa.....</b>	<b>67</b>
<b>7.3 Dimenzioniranje spojev in prikaz uporabe makrojev.....</b>	<b>69</b>
<b>7.3.1 Momentni spoj.....</b>	<b>69</b>
<b>7.3.1.1 Kontrola robustnosti spoja .....</b>	<b>77</b>
<b>7.3.2 Členkast spoj z vezno pločevino.....</b>	<b>78</b>
<b>7.3.3 Priključek nateznega elementa .....</b>	<b>84</b>
<b>8 ZAKLJUČEK .....</b>	<b>88</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>89</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Legenda točk, kjer lahko nastopi porušitev .....	11
Preglednica 2: Redukcijska faktorja $\beta_2$ in $\beta_3$ .....	46
Preglednica 3: Seznam zank v VBA .....	59
Preglednica 4: Kombinacije obtežb .....	63

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Sprememba kota med spojenima elementoma (Vir: Beg, Pogačnik, 2009, 3-93) .....	1
Slika 2: Razvrščanje spojev po togosti (Vir: Beg, Pogačnik, 2009, 3-94) .....	2
Slika 3: Rezultati testa - razvrščanje spojev po togosti (Vir: SCI in BSCA, 1997, 4) .....	3
Slika 4: Rezultati testa - razvrščanje spojev po nosilnosti (Vir: SCI in BSCA, 1997, 4) .....	4
Slika 5: Rezultati testa - razvrščanje spojev po duktilnosti (Vir: SCI in BSCA, 1997, 4) .....	4
Slika 6: Robne oddaljenosti in razmiki med vijaki .....	6
Slika 7: Prikaz možnosti izvedbe izreza pasnic prečke. (Vir: SCI in BCSA, 2011, 7) .....	7
Slika 8: Prikaz ukrepov za lažjo montažo večjih nosilcev. (Vir: SCI in BCSA, 2011, 11) .....	9
Slika 9: Prikaz točk, kjer lahko nastopi porušitev (Vir: SCI in BSCA, 1997, 9) .....	11
Slika 10: Prikaz načinov porušitve. Način tri predstavlja neduktilno porušitev. (Vir: SCI in BSCA, 1997, 9) .....	12
Slika 11: Prikaz strižnih ojačitev (Vir: SCI in BSCA, 1997, 13) .....	15
Slika 12: Vrednosti parametra $\alpha$ za ojačane pasnice stebra in čelne pločevine (Vir: [1], 2005, 81) .....	16
Slika 13: Prikaz določitve pripadajoče dolžine $L_t$ za dve in za eno vrsto vijakov. (Vir: SCI in BSCA, 1997, 24) .....	17
Slika 14: Prikaz primera določitve ustrezne dolžine ojačitve $L_s$ (Vir: SCI in BSCA, 1997, 36) .....	18
Slika 15: Sodelujoča širina pri nosilnosti stojine stebra (Vir: SCI in BSCA, 1997, 27) .....	19
Slika 16: Sodelujoča širina pri uklonu stojine stebra (Vir: SCI in BSCA, 1997, 27) .....	20
Slika 17: Premaknitev osno-upogibne obremenitve v prijemališče rezultante tlačnih sil. ....	22
Slika 18: Določitev sil v vijakih pri izračunu mejne nosilnosti spoja. (Vir: SCI in BSCA, 1997, 30) ..	22
Slika 19: Prikaz ojačitve stebra v tlačni coni (Vir: SCI in BSCA, 1997, 32) .....	24
Slika 20: Prikaz ojačitve pasnice stebra (Vir: SCI in BSCA, 1997, 34) .....	25
Slika 21: Prikaz treh tipov strižne ojačitve K, N in Morris. (Vir: SCI in BSCA, 1997, 34) .....	27
Slika 22: Prikaz razdelitve stojine prečke na območje natega in striga (Vir: SCI in BSCA, 1997, 40) ..	29
Slika 23: Prikaz vute in razporeditev sil (Vir: SCI in BSCA, 1997, 41) .....	31
Slika 24: Prikaz izvedbe členkastega spoja, kjer je $t_{w,b1}$ ... debelina stojine podpirajočega elementa (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 108) .....	32
Slika 25: Prikaz izvedbe ojačitev dolgih veznih pločevin. Levo primer spoja nosilec-nosilec, desno trije primeri ojačitev spoja steber-nosilec (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 108) .....	33
Slika 26: Prikaz izvedbe členkastega soja, kjer so označene količine, ki jih uporabimo pri računu strižne odpornosti vijakov (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 114) .....	35
Slika 27: Prikaz ročice nominalnega momenta $z$ in razdalje od čela podpirajočega elementa do prve vrste vijakov $z_p$ (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 108) .....	38

Slika 28: Prikaz modela za kontrolo interakcije strig – upogib pri spoju z vezno pločevino (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 112).....	39
Slika 29: Definicija geometrijskih karakteristik nosilca z izrezanima deloma zgornje pasnice (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 112).....	40
Slika 30: Primer, kjer sta podprti dve prečki na nasprotni strani pasnice stebra. (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 112) .....	42
Slika 31: Plastifikacija stojine vroče valjanega prereza (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 122) .....	43
Slika 32: Plastifikacija stene votlega prereza (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 123).....	43
Slika 33: Plastifikacija stene cevi (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 124).....	44
Slika 34: Prikaz tipičnega priključka nateznega elementa na vezno pločevino (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 108) .....	45
Slika 35: Prikaz priključka elementa preko »T« elementa a), preko vezne pločevine b) in raznos obremenitve v »T« elementu c) (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 247) .....	47
Slika 36: Priključek diagonalnega elementa na vozliščno pločevino, kjer ni prisotne ekscentričnosti (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 248) .....	48
Slika 37: Raznos obtežbe v nategu (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 249).....	49
Slika 38: MacLeamyjeva krivulja (Vir: [3], 10) .....	51
Slika 39: Prikaz momentnega spoja s čelno pločevino. Prikazano je tudi pogovorno okno, kjer spreminjamo parametre spoja.....	55
Slika 40: Prikaz uporabe orodja ComponentVariableImporter .....	56
Slika 41: Spremenljivke v Komponenti 11 .....	60
Slika 42: Shema makroja za dimenzioniranje komponente 11 .....	61
Slika 43: Model konstrukcije v programu Scia Engineer z označeno lokacijo spojev .....	62
Slika 44: Prečni prerez v osi 3 .....	63
Slika 45: Prikaz oblikovanja in postavitve spojev ter ekscentričnosti, ki se ob tem pojavi .....	65
Slika 46: Izpis obremenitev najbolj obremenjenega stebra iz programa Scia Engineer .....	66
Slika 47: Prikaz obravnavanih spojev – momentni (steber-prečka), členkast z vezno pločevino (steber-modra prečka) in priključek nateznega elementa.....	69
Slika 48: Prikaz razdalj med vijaki .....	70
Slika 49: Prikaz nosilnosti posameznih vrst vijakov.....	72
Slika 50: Prikaz karakteristik členkastega spoja .....	79

»Ta stran je namenoma prazna.«

## 1 UVOD

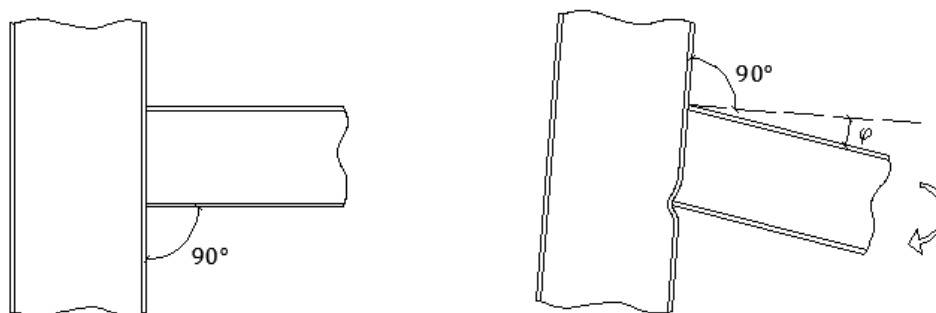
Spoji v jeklenih konstrukcijah služijo povezovanju posameznih elementov v celotno konstrukcijo. Zagotoviti morajo prenos obremenitve, ustrezno podporo elementu in imeti zadostno robustnost, da zagotovijo delovanje konstrukcije kot celote. Zgodovinsko gledano se je spoje projektiralo le na nosilnost. Ostalim karakteristikam, kot sta togost in duktilnost, se je posvečalo manj pozornosti. Ker je dimenzioniranje spojev precej zamudno, lahko v strokovni literaturi zasledimo že pripravljene rešitve jeklenih spojev, ki ustrezajo določenim obremenitvam. Danes skušamo tabele nadomestiti z računalniškimi programi. V naslednjih poglavjih bomo opisali postopek projektiranja jeklenih spojev na podlagi [1] in [2]. Snov je povzeta po [4] in [5]. Opisani bodo postopki za:

- Momentni spoj s čelno pločevino (steber-prečka).
- Členkast spoj z vezno pločevino (prečka-prečka, steber-prečka).
- Priključek diagonale prek vozliščne pločevine.

Posamezni algoritem projektiranja zavzema vse komponente spoja. Sprva so navedene konstrukcijske zahteve, ki se nanašajo predvsem na geometrijo spoja; nato še kontrola nosilnosti vsakega elementa posebej v mehanizmu prenosa obtežbe skozi spoj. Kontrole se nanašajo na danes veljavne predpise Evrokod 3.

### 1.1 Splošno o jeklenih spojih

Spoje lahko delimo na več načinov. V tem poglavju bomo obravnavali le vijáčene. Delimo jih glede na togost, nosilnost ter rotacijsko kapaciteto. Ena od lastnosti spojev je togost - odpornost na rotacijo. Z izrazom rotacija je mišljen medsebojni zasuk dveh elementov, ki ga označimo s  $\varphi$  in ga najbolje opiše naslednja slika:

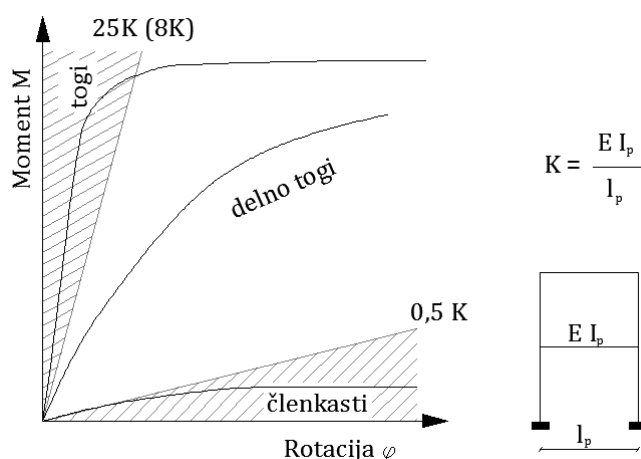


Slika 1: Sprememba kota med spojenima elementoma (Vir: Beg, Pogačnik, 2009, 3-93)

V tem pogledu spoje delimo na:

- toge: imajo tako majhno rotacijo, da lahko zanemarimo vpliv le-te na obnašanje celotne konstrukcije,
- delno toge: spoj, ki je preveč prožen, da bi ga lahko opredelili kot togega. Vpliv rotacije moramo upoštevati pri odzivu konstrukcije,
- nominalno členkaste spoje: za potrebe analize jih lahko obravnavamo kot členke.

Nominalno členkasti spoji morajo prenesti celotno obremenitev, brez pojava momentne obremenitve, ki bi sicer negativno vplivala na elemente in konstrukcijo kot celoto. Morajo biti sposobni razviti zadostno rotacijo pri projektni obremenitvi. Delno togi spoji so spoji, ki jih ne moremo uvrstiti v nobeno skupino od navedenih. Meja med delno togimi in togimi spoji je  $25K$  za pomične okvire in  $8K$  za nepomične, kjer je  $K = E \cdot I_p / l_p$ .  $I_p$  je vztrajnostni moment prečke,  $l_p$  pa dolžina prečke, ki jo priključujemo v spoj.

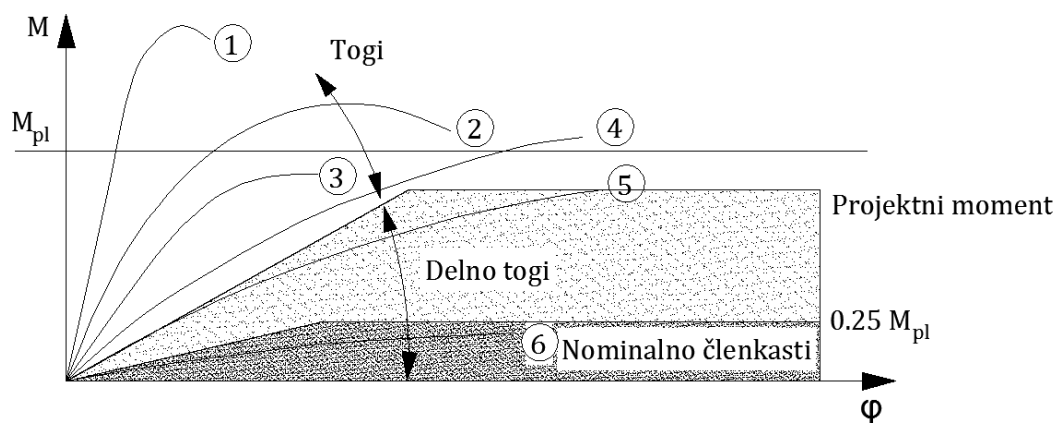


Slika 2: Razvrščanje spojev po togosti (Vir: Beg, Pogačnik, 2009, 3-94)

Za boljše ponazoritev napisanega prikažemo še rezultate testov, kjer so merili odpornost na upogibno obremenitev spoja v odvisnosti od rotacije v spoju za 6 različnih spojev.

Primeri (glej Slika 3) 1, 2, 3 in 4 so togi, saj njihova krivulja upogibne odpornosti v odvisnosti od rotacije poteka nad mejo, tj.  $8 \cdot K$  [1]. Primer 5 je delno tog in primer 6 je nominalno členkasti spoj, saj se nahaja pod  $0,25 \cdot M_{pl}$ , kjer je  $M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y$  in je  $W_{pl}$  plastični odpornostni moment profila. Na grafu je označena še vrednost projektne momenta.





Slika 3: Rezultati testa - razvrščanje spojev po togosti (Vir: SCI in BSCA, 1997, 4)

Togost  $S_j$  določimo iz prožnosti osnovnih komponent spoja, ki jih opišem z elastičnimi prožnostnimi koeficienti  $k_i$ . Postopek je opisan v poglavju 6.3 v [1]. Togost določimo z izrazom:

$$S_j = \frac{E \cdot z^2}{\mu \cdot \sum_i \frac{1}{k_i}},$$

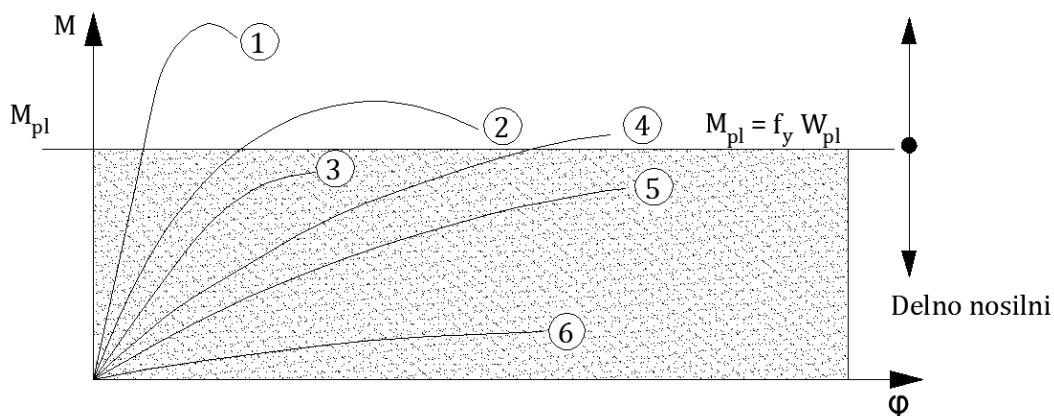
kjer je  $E$  elastični modul materiala,  $z = h - t_f$  ročica sil v prečki,  $\mu = S_{j,ini} / S_j$  koeficient togosti.

Spoje lahko delimo tudi po nosilnosti; tu govorimo o odpornosti na upogibno obremenitev. Delimo jih na:

- polnosilne spoje: odpornost spoja je enaka ali večja odpornosti priključenega elementa,
- delnosilne spoje: odpornost spoja je manjša od odpornosti priključenega elementa,
- nominalno členkaste spoje.

Pri nominalno členkastih spojih mora veljati, da nosilnost na upogibno obremenitev ne sme presegati 25% projektne upogibne nosilnosti priključenega elementa. Pri polno nosilnih spojih je odpornost elementa večja ali vsaj enaka projektni plastični nosilnosti priključenega elementa. To delitev uporabljamo predvsem za potrebe globalne analize konstrukcije. Pri spojih, ki niso polno nosilni, moramo v primeru plastične analize dokazati zadostno rotacijsko kapaciteto, saj se bo plastični členek razvil prav tam. Tukaj je priporočljivo uporabljati spoje, za katere je s testi dokazana ustrezna rotacijska kapaciteta.

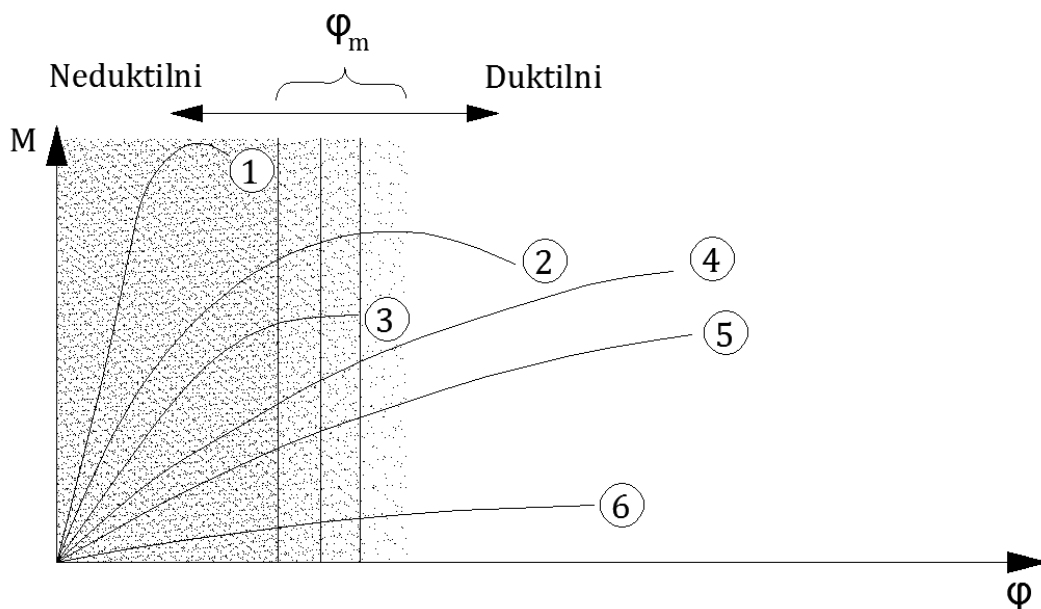
Delitev spojev ponazorimo na istem primeru šestih spojev, ki smo jih uporabili zgoraj.



Slika 4: Rezultati testa - razvrščanje spojev po nosilnosti (Vir: SCI in BSCA, 1997, 4)

Opazimo, da so spoji 1, 2 in 4 polno nosilni, saj velja  $M \geq M_{pl}$ . Spoja 3 in 5 sta delno nosilna, saj je  $M < M_{pl}$ .

Določiti togost in duktilnost spoja je precej zahteven postopek; zato je priporočljivo upoštevati navodila za dimenzioniranje spojev. Le-ta so s poskusi dokazana in zagotavljajo ustrezno mero togosti oz. duktilnosti. Duktilnost spoja lahko definiramo kot lastnost spoja, ki ima zadostno rotacijsko kapaciteto, da se obnaša kot plastični členek, tj. da se je ob določeni obremenitvi sposoben plastično deformirati brez porušitve in da se ob tem nosilnost spoja ne zmanjša.



Slika 5: Rezultati testa - razvrščanje spojev po duktilnosti (Vir: SCI in BSCA, 1997, 4)

Meja med duktilnimi in neduktilnimi spoji  $\varphi_m$  je težko določljiva in znaša približno  $\varphi_m = 0,02 \sim 0,03$  radianov. Opazimo, da je primer 1 neduktilen, primer 3 je ravno na meji, ostali pa so duktilni.

Pri zagotavljanju robustnosti konstrukcij morajo biti horizontalne vezi, ts. spoji steber-prečka in vertikalne vezi, ts. preklopni spoji na stebrih, dimenzionirane, tako da prevzamejo natezne sile. Le-te so odvisne od kategorije objekta, vendar znašajo vsaj 75 kN. Pri členkastih spojih z vezno pločevino, ki jih dimenzioniramo v skladu s priporočili, je zagotovljena ustrezna natezna odpornost. Pozorni moramo biti predvsem pri enostranskih spojih steber-prečka, kjer je vezna pločevina privarjena na stojino stebra oz. na steber z votlim prerezom (plastifikacija pločevin). Tukaj naj opomnimo, da se vertikalna in horizontalna obremenitev pri projektiranju robustnosti konstrukcije ne kombinirata, saj nikoli ne nastopita sočasno.

V jekleni večetažni okvirni konstrukciji predstavljajo spoji 5% celotne teže, v finančnem pogledu pa 30%. Zato se pogosto spoje dimenzionira, tako da so detajli čim bolj enostavni kakor tudi proizvodnja in montaža. Od tod izvira težnja po standardizaciji spojev. Standardizacija, kjer so vijaki, zvari in geometrija popolnoma definirani, ima naslednje prednosti:

- Manjše število tipov spojev, kar vodi v boljše razumevanje delovanja spojev in zmanjšanje stroškov, kakor tudi pospešuje razvoj računalniških pripomočkov za dimenzioniranje.
- Uporaba standardiziranih veznih sredstev povečuje njihovo dostopnost na trgu, zmanjšuje materialne stroške in skrajša nakupni, shranjevalni in proizvodni čas.
- Uporaba vijakov istega lastnostnega razreda, premera in omejenih dolžin s polnim navojem poenostavi delo v delavnici, pospeši montažo, zmanjša verjetnost napak na gradbišču in zmanjša stroške nabave vijakov (na istem projektu se je priporočljivo izogibati uporabi vijakov istih dimenzij, a različnih kvalitet).
- Z uporaba kotnih zvarov se izognemo pripravi zaključkov pločevin in zmanjšamo potrebo po testiranju zvarov.

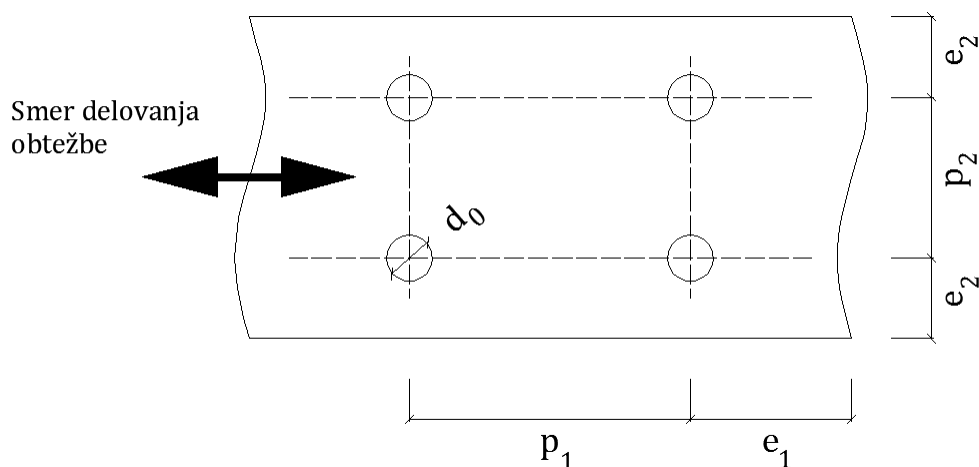
Standardizirani spoji ne pokrijejo vseh potreb jeklenih konstrukcij, ki so edinstvene, vendar se tudi v teh primerih lahko poslužujemo uporabe standardiziranih veznih sredstev, prerezov in vijakov.

## 1.2 Razporeditev vijakov

Pri vijačenih spojih definiramo premer lukenj  $d_0$  v elementih in veznih oz. čelnih pločevinah kot:

$$d_0 = \begin{cases} d + 2mm; & d \leq 24mm \\ d + 3mm; & d > 24mm \\ d + 6mm; & \text{sidra} \end{cases}$$

Pri temeljnih pločevinah, ki so debelejšje od 60 mm, je potrebno premer luknje povečati za 6 mm. V izrazih spodaj zasledimo parameter  $t$ , ki predstavlja manjšo od debelin priključenih pločevin.



Slika 6: Robne oddaljenosti in razmiki med vijaki

Luknje za vijake razporedimo, tako da veljajo zanje naslednje omejitve. Omejitve izhajajo iz pogojev preprečevanja izbočitve pločevine in korozijske izpostavljenosti:

- robna razdalja v smeri delovanja obtežbe  $e_1 \approx 2,0 \cdot d_0 - 2,5 \cdot d_0$

$$1,2 \cdot d_0 \leq e_1 \leq \begin{cases} \text{MAX}(8 \cdot t, 125mm); & \text{ni nevarnosti korozije} \\ 40 + 4 \cdot t; & \text{izpostavljeno koroziji} \end{cases}$$

- razmik med vijaki v smeri delovanja obtežbe  $p_1 \approx 3,0 \cdot d_0$

$$2,2 \cdot d_0 \leq p_1 \leq \text{MIN}(14 \cdot t, 200mm)$$

- robna razdalja prečno na smer delovanja obtežbe  $e_2 \approx 1,5 \cdot d_0$

$$1,2 \cdot d_0 \leq e_2 \leq \begin{cases} \text{MAX}(8 \cdot t, 125mm); & \text{ni nevarnosti korozije} \\ 40 + 4 \cdot t; & \text{izpostavljeno koroziji} \end{cases}$$

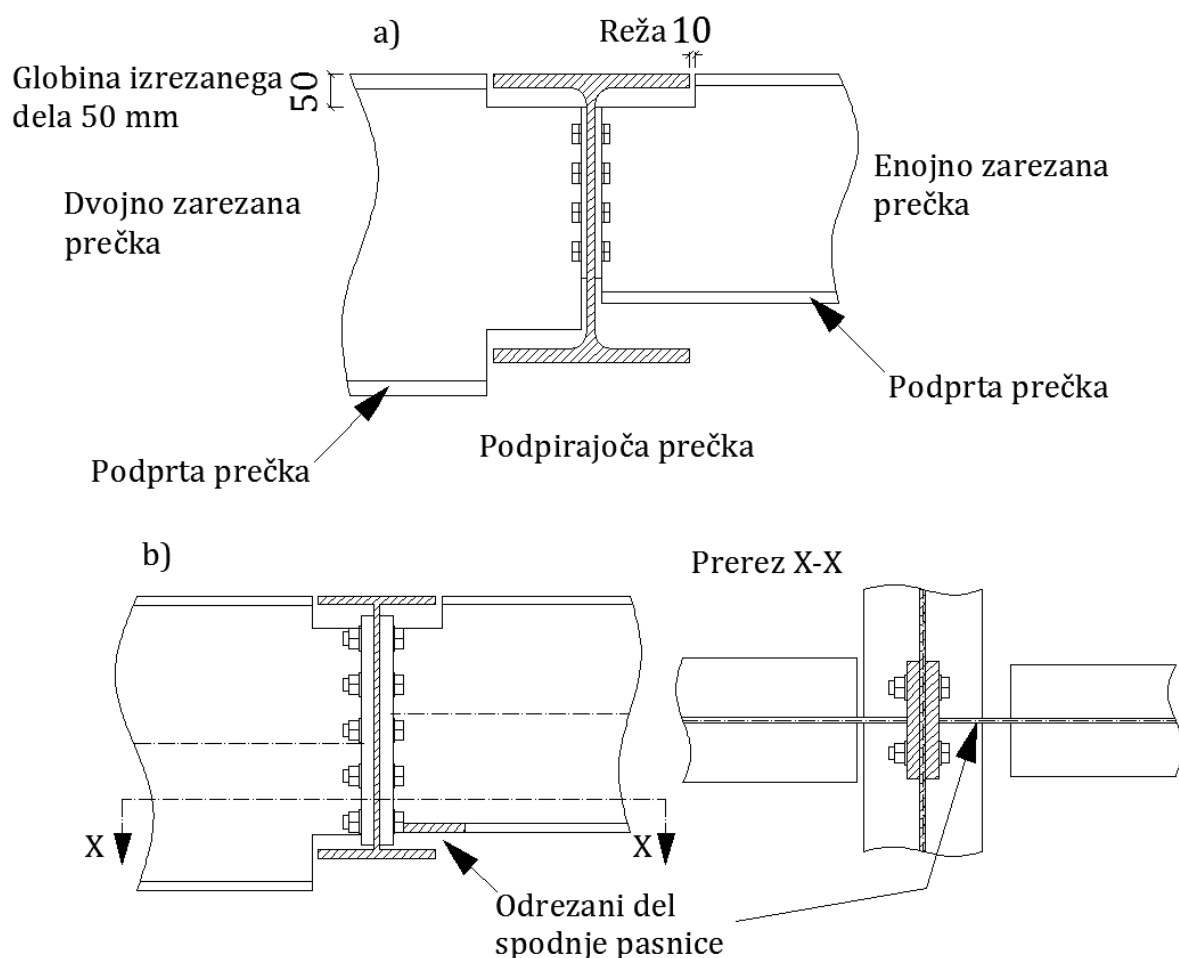
- razmik med vijaki prečno na smer delovanja obtežbe  $p_2 \approx 3,0 \cdot d_0$

$$2,4 \cdot d_0 \leq p_2 \leq \text{MIN}(14 \cdot t, 200mm)$$

Luknje vrtamo. Sicer jih lahko tudi prebijamo, vendar to le manjše luknje v tanjše pločevine iz mehkejšega materiala. Primer: v pločevine tanjše od 12 mm in kvalitete jekla slabše od S275 prebijamo luknje s premerom manjšim od 26 mm.

### 1.3 Zareze v priključenih elementih

V določenih primerih moramo zaradi geometrijskih pogojev priključene elemente zarezati, da elementa lahko sploh spojimo. Pogosto moramo v spojih prečka–prečka zagotoviti, da sta zgornji ploskvi priključenih elementov v istem nivoju (glej Slika 7 a). Takrat moramo odrezati del zgornje pasnice podprte prečke, da vzpostavimo kontakt s stojinama priključenih elementov. Izvedemo jih z zaokrožitvijo ob vrhu nosilca. Dolžina izreza naj bo za 10 mm večja od razdalje od roba izrezane pasnice do stojine podpirajočega elementa. Sicer lahko dolžina zareze tudi variira, saj se mora prilagoditi širini podpirajočega elementa. Vendar je priporočljivo ohranjati dolžino zareze čim manjšo, da se izognemo lokalnim problemom s stabilnostjo. Globina zareze naj znaša 50 mm oz. toliko, kot je predvideno v tabelah za dimenzioniranje.



Slika 7: Prikaz možnosti izvedbe izreza pasnic prečke. (Vir: SCI in BCSA, 2011, 7)

Kadar imamo primer, ko se prečki različnih višin stikata na nasprotnih straneh stojine podpirajočega nosilca ali stebra, lahko pride do trka vijakov s spodnjo pasnico manjše prečke (glej Slika 7 b). Ta problem rešimo tako, da odrežemo del spodnje pasnice. Take situacije se pogosto zgodijo, kadar so v spoju prisotne še prečke sekundarnega okvira, ki poteka prečno na smer primarnega.

Včasih je potrebno v primeru spoja steber–prečka od strani odrezati del pasnic prečke, da približamo stojino prečke stojini stebra. Vendar se temu primeru lahko izognemo tudi z ustrežno izbiro stebra in prečke.

#### **1.4 Avtomatizacija dimenzioniranja spojev**

Dimenzioniranje spojev lahko avtomatiziramo. V okviru te diplomske naloge smo to storili v obliki datoteke Excel z makroji, kjer smo kodo programa napisali v programskem jeziku Visual Basic for Applications (VBA). Z avtomatizacijo dimenzioniranja se zmanjša možnost napak, omogoči standardizacija spojev in zmanjša stroške projektiranja jeklenih konstrukcij; slednje pomeni tudi večjo konkurenčnost v primerjavi z ostalimi nosilnimi materiali konstrukcij.

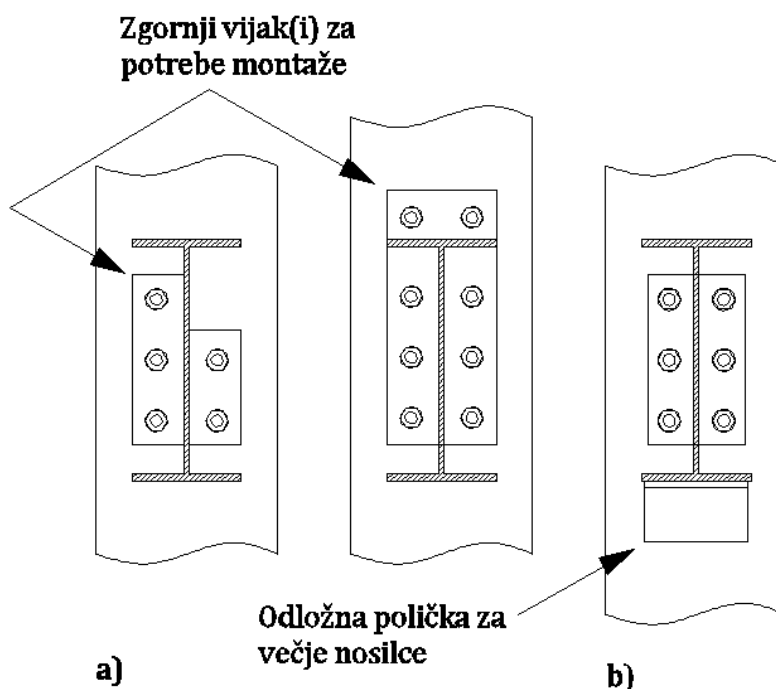
Če orodja za dimenzioniranje izdelamo, tako da jih lahko uporabimo v povezavi z modelirniki BIM, potem se poveča še uporabnost BIM programov. Na tak način projektant naredi model spoja v BIM modelu in z uporabo orodij za dimenzioniranje prekontrolira spoj.

Vendar je pri uporabi programov in podobnih orodij za pomoč pri projektiranju konstrukcij najpomembnejša inženirska presoja dobljenih rezultatov.

## 2 MOMENTNI SPOJ S ČELNO PLOČEVINO

V tem poglavju bomo obravnavali spoje, kjer je čelna pločevina večja od višine prečke. Pri takšnih spojih je čelna pločevina privarjena v delavnici, medtem ko prečke privijačijo na stebre na gradbišču. Čelna pločevina je privarjena tako na stojino kot tudi na pasnici. Spoji, kjer je prečka privarjena po celotnem obodu, bodo zagotovili tudi večjo varnost pri zagotavljanju horizontalnih vezi v konstrukciji (robustnost konstrukcije). Taki spoji so lahko po nosilnosti členkasti, polno nosilni ali takšni, da ne izpolnjujejo pogojev za omenjeni skupini.

Pogosto se pojavijo težave pri gradnji, saj taki spoji nudijo zelo malo možnosti za prilagajanje na gradbišču. Da se izognemo akumulaciji toleranc pri zaporednem sestavu prečk, umestimo v določenem intervalu (vsak peti nosilec) malce krajši nosilec od ostalih nosilcev v kompletu. Prav tako se lahko pojavijo nevšečnosti pri stikovanju nosilcev na obeh straneh preko stojine stebra. Tukaj oba nosilca uporabljata iste vijake in morajo luknje od obeh pločevin sovpadati. Pri večjih nosilcih je smotrno uporabiti dodatne luknje in podaljške veznih pločevin, ki služijo lažji montaži na gradbišču (glej Slika 8 a). Lahko uporabimo tudi »odložno poličko«, na katero nosilec odložimo, preden ga privijačimo (glej Slika 8 b).



Slika 8: Prikaz ukrepov za lažjo montažo večjih nosilcev. (Vir: SCI in BCSCA, 2011, 11)

Proizvodnja polno nosilnih momentnih spojev je neprimerno dražja kot proizvodnja členkastih. Razlika v stroških proizvodnje med delno nosilnimi in polno nosilnimi momentnimi spoji je sicer

manjša. Medtem ko so polno nosilni togi spoji z vutami na nosilcih in ojačanimi stebri izredno dragi, kar izredno podraži celoten projekt. Zato toge več-etažne okvirne konstrukcije niso tako popularne na tržišču čeprav imajo določene prednosti, kot so večji razponi, nižje prečke in nadstropja brez diagonalnih povezij. Ob tem naj opozorimo na enoetažne okvirje, kjer uporaba vut v spojih poceni projekt, saj uporaba takih spojev dovoljuje manjše prečke. Vodilo projektantu glede zmanjševanja stroškov spojev je, da skuša čim bolj zmanjšati človeško delo, saj cena materiala in veznih sredstev predstavlja pri stroških spojev zelo majhen delež. Večino predstavljajo projektiranje spojev, detajliranje, izdelava veznih pločevin, natančna določitev geometrije, vrtanje lukenj, varjenje in testiranje.

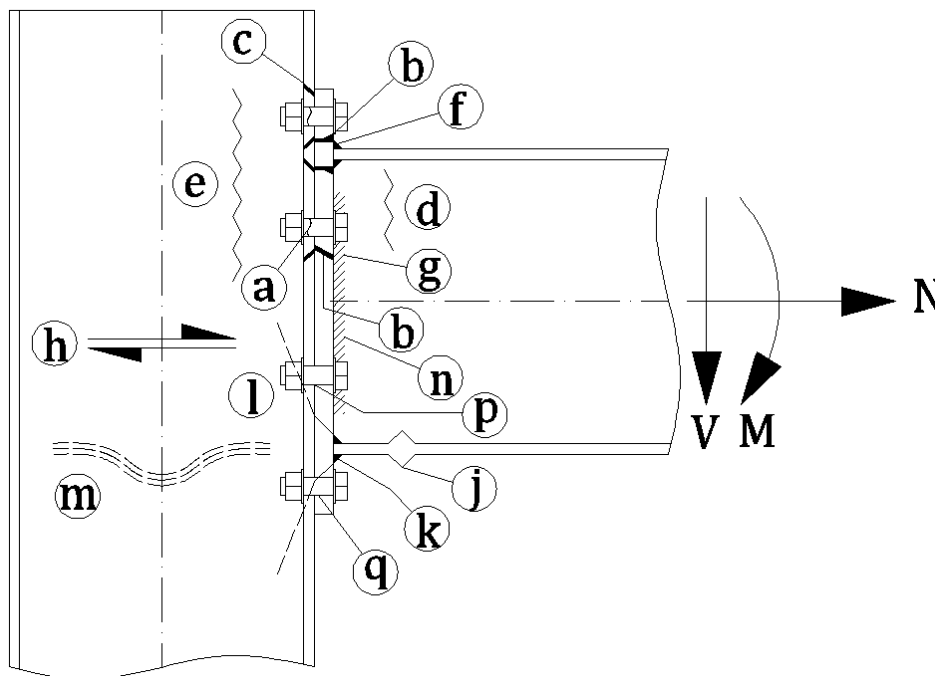
Nekaj navodil za zmanjšanje stroškov, ki jih predstavljajo spoji:

- Izogibati se kompleksnosti spoja zaradi ekscentričnosti in ukrivljenosti.
- Uporabiti standardizirane spoje, kjerkoli je to mogoče.
- Racionalizirati uporabo prereзов pločevin, uporabiti standardizirane debeline in material, ki je množično uporabljen.
- Omejiti nabor vijakov po kvaliteti in velikosti. Naj bosta M20 in M24 kvalitete 8.8 prva izbira.
- Uporabljati spoje s prednapetimi vijaki kot zadnjo možnost, tj. v primerih, kjer je nevarnost utrujanja in kjer je zdrs v spoju nedopusten.
- Premisliti, ali raje povečati steber oziroma prečko, preden se umesti dodatne pločevine itd., saj so rešitve, ki imajo najmanjšo maso, lahko tudi najmanj ekonomične.
- Upoštevati nasvete proizvajalcev konstrukcij, saj po navadi z veseljem postrežejo z informacijami o stroških dela brez nadaljnjih obveznosti.

Obtežna pot v spoju s čelno pločevino je taka, da upogibno obremenitev prevzamejo natezne sile v vijakih in tlačna sila v nasprotni pasnici. Če ni prisotne osne sile, sta sili enaki. Testi so pokazali, da je center rotacije v spoju v mejnem stanju nosilnosti v tlačeni pasnici oz. v njeni bližini. Zato je smotrno upoštevati, da je tlačna sila skoncentrirana v višini tlačene pasnice. Privzamemo lahko trikotno razporeditev nateznih sil v vijakih ali pa plastično razporeditev sil med vijaki, kjer so sile enake nosilnosti posamezne vrste vijakov. Sila v vrsti vijakov ni odvisna le od oddaljenosti vijaka do točke rotacije – ročice, ampak tudi od ostalih pogojev; npr. vijaki v bližini pasnice prevzamejo večjo obremenitev. V primeru, ko bolj obremenjene vrste vijakov dosežejo svojo nosilnost, se presežna sila prenese na sosednje vrste, ki imajo še rezerve v nosilnosti. Vendar se takšna razporeditev obremenitve zgodi, le če so zagotovljeni ustrezni geometrijski pogoji, da pride do za to potrebne deformacije.



Kadar projektiramo spoje s čelno pločevino, moramo v splošnem opraviti 15 kontrol, ki se nanašajo na določena mesta v spoju. Slednja so prikazana na naslednji sliki ter navedena v priloženi preglednici.



Slika 9: Prikaz točk, kjer lahko nastopi porušitev (Vir: SCI in BSCA, 1997, 9)

Preglednica 1: Legenda točk, kjer lahko nastopi porušitev

OBMOČJE	SKLIC	MESTO V SPOJU
NATEG	a	Nateg v vijakih
	b	Upogib vezne pločevine
	c	Upogib pasnice stebra
	d	Nateg v stojini prečki
	e	Nateg v stojini stebra
	f	Zvar med pasnico in čelno pločevino
	g	Zvar med stojino in čelno pločevino
STRIG V HORIZONTALNI SMERI	h	Strig v stojini stebra

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

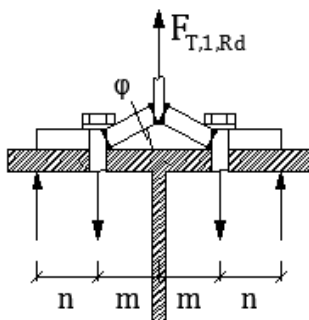
TLAK	j	Tlak v pasnici prečke
	k	Zvar med pasnico in čelno pločevino
	l	Tlak v stojini stebra
	m	Uklon stojine stebra
STRIG V VERTIKALNI SMERI	n	Zvar med stojino in čelno pločevino
	p	Strig v vijakih
	q	Nosilnost na bočni pritisk (čelna pločevina ali pasnica stebra)

### 2.1.1 Natezna cona

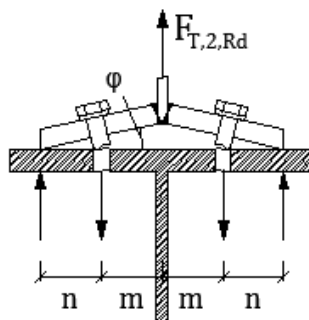
Odpornost v vsaki vrstici vijakov v natezni coni je omejena z enim izmed teh pogojev:

- upogibno nosilnostjo pasnice stebra in natezno nosilnostjo vijakov,
- upogibno nosilnostjo vezne pločevine in natezno nosilnostjo vijakov,
- natezno nosilnostjo stojine stebra,
- natezno nosilnostjo stojine prečke,
- natezno nosilnostjo vijakov.

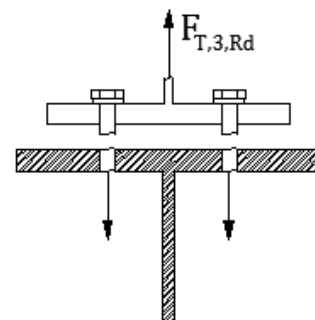
Način 1:  
Plastifikacija v pasnici



Način 2:  
Nateg vijakov in  
plastifikacija v pasnici



Način 3:  
Nateg vijakov



Tanke pločevine /  
močni vijaki



Debele pločevine /  
tanki vijaki

Slika 10: Prikaz načinov porušitve. Način tri predstavlja neduktilno porušitev. (Vir: SCI in BSCA, 1997, 9)

Za izračun nosilnosti natezne cone spoja uporabimo pristop, ki je podan v Evrokodu 3, tj. z **nadomestnimi T elementi**. Le-ta se lahko poruši na tri načine prikazane na Slika 10. Do izrazov za izračun natezne nosilnosti posameznega T elementa pridemo s pomočjo izrazov virtualnega dela.

- Način 1:

$$\delta W_z = \delta W_n$$

$$\varphi \cdot m \cdot F_{T,1,Rd} = 4 \cdot M_{pl,1,Rd} \cdot \varphi$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m}$$

- Način 2:

$$\delta W_z = \delta W_n$$

$$2 \cdot \varphi \cdot (n + m) \cdot \frac{1}{2} F_{T,2,Rd} = 2 \cdot \varphi \cdot M_{pl,2,Rd} + \varphi \cdot n \cdot \sum F_{T,Rd}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot \sum F_{T,Rd}}{n + m}$$

- Način 3:

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{T,Rd}$$

V izrazih zasledimo  $m$  razdalja od središča vijaka do vključno 20% zakrivljenosti stojine stebra ali 20 % kraka kotnega zvara,  $n = \min(1, 25 \cdot m, e)$  oz.  $\min(1, 25 \cdot m_x, e_x)$  učinkovita robna razdalja; dimenziji  $z$  indeksom  $x$  predstavljata vertikalne razdalje pri podaljšanju vezne pločevine nad ali pod prečko, sicer so horizontalne in  $e$  robna razdalja.

Pri delno nosilnih spojih dimenzioniramo, tako da ni kritičen tretji način porušitve, saj je neduktilen. V primeru, da je  $F_{T,3,Rd}$  manjši od obeh predhodnih sil, spoj ustrezno izboljšamo. To praviloma ne velja pri polno nosilnih spojih, saj se tam plastični členek razvije v sami prečki in zagotovitev duktilnosti v spoju ni potrebna.

Linije plastifikacije oz. efektivno dolžino plastificiranega območja pripadajočega T elementa, ki nastanejo v bližini vijakov, modeliramo z efektivnimi dolžinami. Podane so za neojačano pasnico stebra (Tabela 6.4 v [1]), ojačano pasnico stebra (Tabela 6.5 v [1]) in za čelno pločevino (Tabela 6.6 v [1]).

Kadar določamo odpornost natezne cone, obravnavamo vsako vrsto vijakov posebej. Pričnemo pri zgornji vrsti 1. Nato se spustimo na vrsto 2, kjer odpornost določimo kot minimum med silo, ki velja

za en vijak, in silo, ki jo določimo, tako da od odpornosti vrst 1 in 2 kot skupine vijakov odštejemo odpornost vrste 1. Tako nadaljujemo. Pri tem upoštevamo, da pasnica prečke ločuje vrste med seboj; zato vrst nad pasnico in pod njo nikoli ne upoštevamo kot isto skupino vijakov. Isti učinek ima ojačitev stebra – rebro. Pri takem računu upoštevamo plastično razporeditev sil v vijakih; sicer upoštevamo trikotno razporeditev. Pogoji, ki mora biti izpolnjen, da upoštevamo plastično razporeditev:

- Na strani prečke:

$$t_{pl} < \frac{d}{1,9} \cdot \sqrt{\frac{f_{ub}}{f_{yp}}}$$

- Na strani stebra:

$$t_f < \frac{d}{1,9} \cdot \sqrt{\frac{f_{ub}}{f_{ys}}}$$

kjer je  $t_{pl}$  debelina čelne pločevine,  $t_f$  debelina pasnice stebra,  $d$  debelina premera vijakov,  $f_{yp}$  napetost tečenja prečke,  $f_{ys}$  napetost tečenja stebra,  $f_{ub}$  natezna trdnost vijakov.

Ukrepi, ki jih imamo na voljo, če se kontrola natezne cone ne izide, so: povečanje vijakov, povečanje debeline čelne pločevine oz. pasnice stebra, povečanje števila vijakov in njihova prerazporeditev.

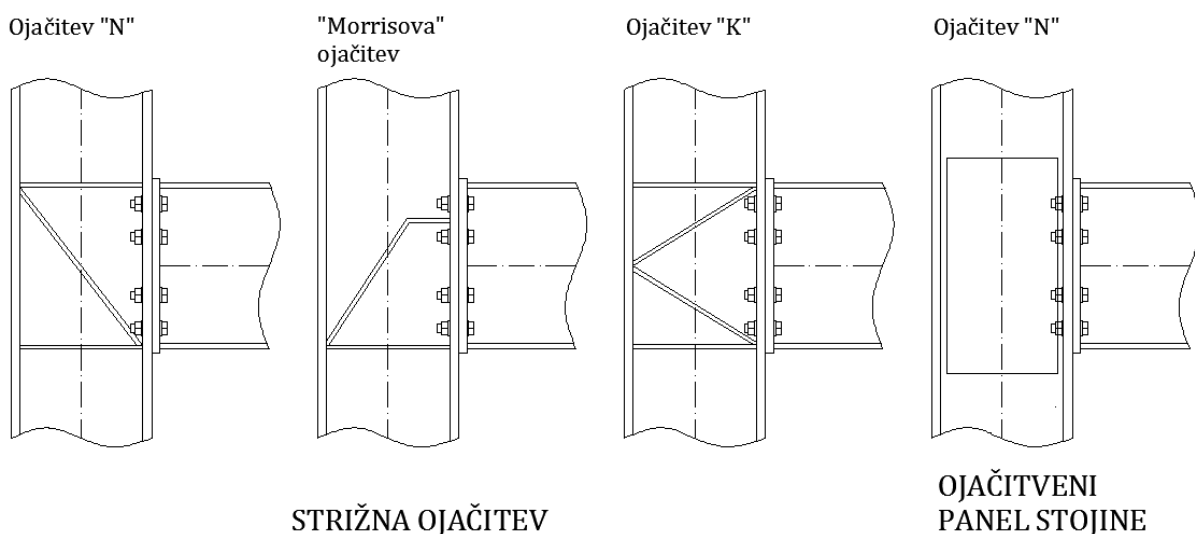
### 2.1.2 Tlačna cona

Tlačno cono kontroliramo kot pri enostavnih spojih. Ker mora tlačna cona v stojini stebra uravnovesiti vse natezne sile v vijakih, se pogosto zgodi, da moramo k stojini stebra v višini pasnice prečke umestiti ojačitvena rebra. Kontrolirati jo moramo tudi na uklon, ampak le v primeru, če v prečni smeri na stojino stebra ni priključenih ostalih nosilcev.

### 2.1.3 Območje striga

Horizontalni strig prevzame stojina stebra. Tukaj moramo upoštevati tudi prispevek morebitne prečke na nasprotni strani stebra, saj gre v tem primeru za rezultanto sil. V primeru, da je v spoju prisotna samo ena prečka, je strižna sila enaka tlačni komponenti. Če je na drugi strani spoja priključena še ena prečka, ki deluje na steber z isto velikim, vendar nasprotno delujočim momentom, potem prečna sila znaša nič. V primeru, kjer pa prečki delujeta z momentoma, ki imata isto smer, imamo opravka z vsoto sil. Porušitev v strigu ni duktilna. Zato se ji moramo izogniti. V ta namen moramo spoje dimenzionirati, tako da je odpornost natezne cone manjša. Lahko uporabimo N, K, Morrisovo ojačitev

ali ojačitev stojine z dodatno pločevino. Slednja deluje tako kot strižna, kot tudi ojačitev natezne oz. tlačne cone.



Slika 11: Prikaz strižnih ojačitev (Vir: SCI in BSCA, 1997, 13)

#### 2.1.4 Postopek projektiranja momentnega spoja

V tem poglavju smo podali postopek projektiranja momentnega spoja. Sprva poiščemo izhodiščni približek spoja na podlagi izkušenj. Nato sledi iterativni postopek. Poračunamo odpornost posamezne vrste vijakov v nategu. Določimo nosilnost v tlačni coni in nato odpornost stojine stebra na strig. Izračunamo odpornostni moment spoja. Če ta ne zadostuje, imamo na razpolago naslednje ukrepe: povečamo vijake, izberemo večjo čelno pločevino, povečamo število vijakov ali povečamo razdalje med njimi. Ko dosežemo, da je projektni moment manjši od nosilnosti spoja, preverimo vijake na strig, dimenzioniramo ojačitve in določimo zware.

##### 2.1.4.1 Odpornost posamezne vrste vijakov v natezni coni

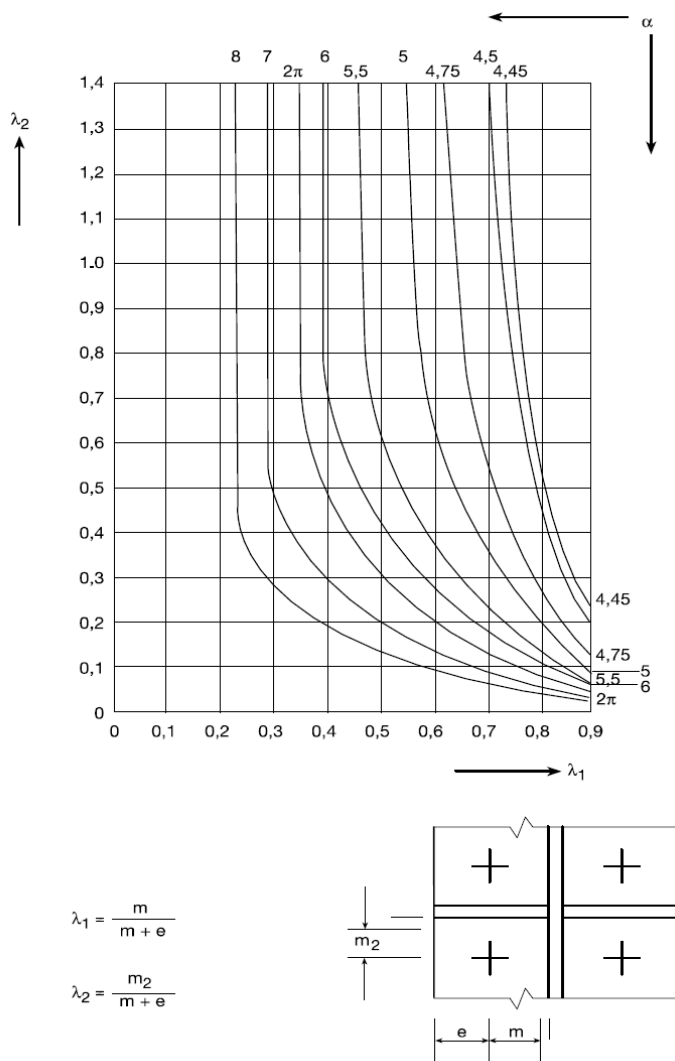
Odpornost je omejena z upogibom pasnice stebra ali čelne pločevine, pretrgom vijakov ali s pojavom, ko je presežena natezna trdnost v stojini stebra oz. pasnice. Obravnavamo vsako vrsto posebej in kot del skupine vijakov nad njo. Vijaki pod izbrano vrsto trenutno niso predmet obravnave. Določimo minimalno silo odpornosti za vsako vrsto vijakov. Plastični odpornostni moment pločevin določimo z naslednjim izrazom:

$$M_{pl,i,Rd} = \frac{l_{eff} \cdot t^2 \cdot f_y}{4},$$

kjer je  $l_{eff}$  efektivna dolžina plastificiranega območja pripadajočega T elementa in  $t$  debelina pasnice stebra ali čelne pločevine.

V primeru, da je merodajen prvi način porušitve, lahko uporabimo podložno pločevino na notranji strani pasnice stebra. Ta ukrep pride v poštev predvsem pri manjših stebrih s tankimi pasnicami.

Efektivno dolžino plastificiranega območja pripadajočega T elementa določimo s pomočjo tabel. Porušitev se lahko zgodi po krožni obliki  $l_{eff,cp}$  ali po poligonalni  $l_{eff,nc}$ . Za nadaljnji izračun uporabimo najmanjšo vrednost:  $l_{eff} = \min(l_{eff,cp}, l_{eff,nc})$ . Pri izračunu sodelujoče dolžine moramo upoštevati geometrijske karakteristike spoja. Posebno pozornost je treba posvetiti določitvi parametra  $\alpha$ . Le-tega določimo iz grafa spodaj na podlagi vrednosti  $\lambda_1$  in  $\lambda_2$ .



Slika 12: Vrednosti parametra  $\alpha$  za ojačane pasnice stebra in čelne pločevine (Vir: [1], 2005, 81)

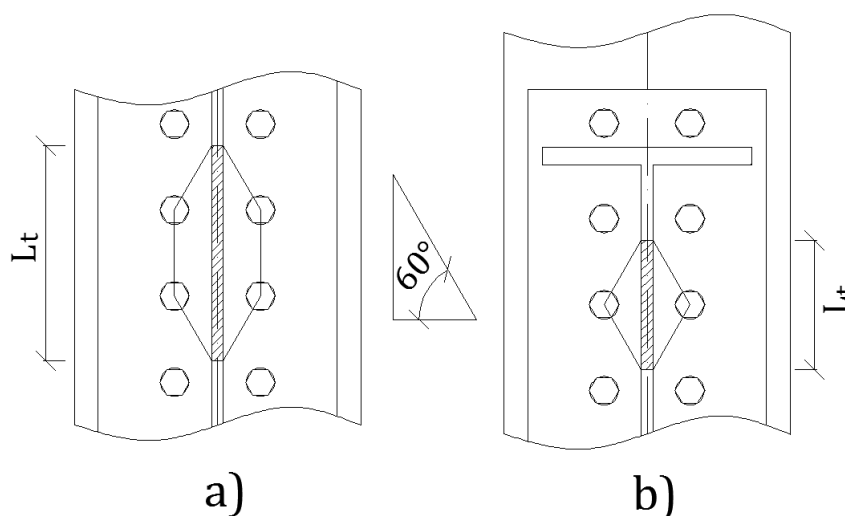
#### 2.1.4.2 Odpornost natezne cone v stojini stebra ali prečke

Kontrolo izvajamo ločeno za steber in prečko. Odpornost določimo z izrazom:

$$F_t = L_t \cdot t_w \cdot f_y ,$$

kjer je  $L_t$  pripadajoča dolžina,  $t_w$  debelina stojine in  $f_y$  napetost tečenja materiala.

Pripadajočo dolžino sojine  $L_t$  določimo z upoštevanjem raznosa obremenitve pod kotom  $60^\circ$  iz središča vijakov. Če kontroliramo samo eno vrsto, upoštevamo efektivno dolžino, kot je prikazano na Slika 13 b. Če pa obravnavamo skupino vijakov, pa imamo situacijo na Slika 13 a. Tukaj upoštevamo še vertikalno razdaljo med vijaki  $p_1$ .



Slika 13: Prikaz določitve pripadajoče dolžine  $L_t$  za dve in za eno vrsto vijakov. (Vir: SCI in BSCA, 1997, 24)

Kontrolo lahko izvajamo za posamezno vrsto ali za skupino vrst vijakov. Preveriti moramo vse kombinacije in določiti najbolj kritično. V primeru, da se kontrola ne izide, lahko izberemo večji prerez stebra oz. prečke, lahko izberemo boljši material; najbolj smotrni ukrep pa je umestitev ojačitve. Ojačitve tudi tukaj ločijo potencialne skupine vijakov med seboj. Pločevine, ki jih umestimo kot natezne ojačitve, morajo biti ustrezno izvedene.

Lahko jih izvedemo po celotni globini stojine stebra ali le delno. Prerez ojačitve določimo kot razliko med obremenitvijo, tj. vsota sil v vijakih nad in pod ojačitvijo, in nosilnostjo stojine. Neto prerez ojačitve mora biti večji ali enak:

$$A_{sn} \geq \frac{F_{ri} + F_{rj}}{f_y} - L_t \cdot t_w ,$$

kjer je  $A_{sn} = 2 \cdot (b_{sn} \cdot t_{sn})$  neto prerez ojačitve,  $b_{sn}$  neto širina natezne ojačitve,  $t_{sn}$  debelina natezne ojačitve,  $F_{ri}$  sila v vrsti vijakov nad ojačitvijo,  $F_{rj}$  sila v vrsti vijakov pod ojačitvijo.

Za bruto širino ojačitve  $b_{sg}$  se pričakuje, da je širša od 75% razpoložljive širine pasnice stebra, tj.  $b_{sg} \geq 0,75 \cdot (b_c - t_{wc}) / 2$ , kjer je  $b_c$  širina pasnice stebra in  $t_{wc}$  debelina stojine stebra. Upoštevati moramo tudi domnevo, da je sila, ki jo prevzame ojačitev, obratno sorazmerna z oddaljenostjo od vijakov. Tako mora prerez ojačitve izpolnjevati še naslednji pogoj:

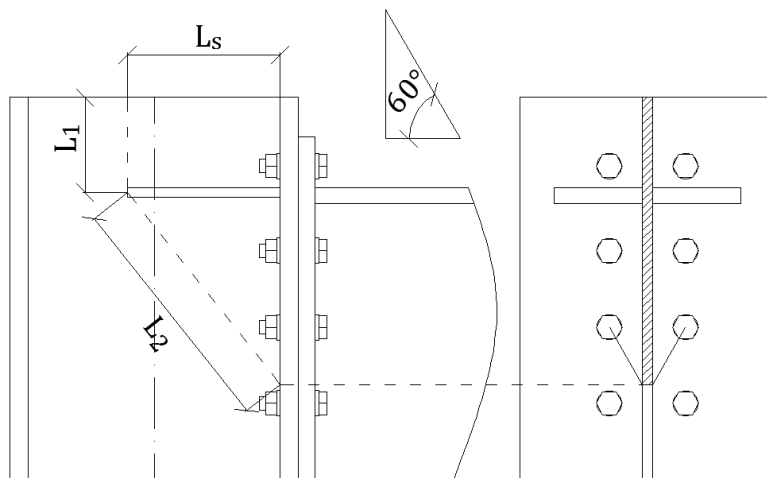
$$A_{sn} \geq \frac{m_1}{f_y} \cdot \left[ \frac{F_{ri}}{m + m_{2L}} + \frac{F_{rj}}{m + m_{2U}} \right],$$

kjer je  $m_{2L}$  razdalja od središča zgornjega vijaka do zvara ojačitve,  $m_{2U}$  razdalja od središča spodnjega vijaka do zvara ojačitve.

Če za dolžino ojačitve velja  $L_s \geq 1,8 \cdot b_{sg}$ , potem nobena dodatna kontrola glede zvarov ni potrebna. Sicer dimenzioniramo zware, tako da upoštevamo vrtišče ojačitve okoli stičišča stojine in pasnice stebra. Dolžina ojačitve  $L_s$  mora biti tolikšna, da prepreči porušitev za vse vrste vijakov v nategu; kakor je prikazano na primeru:

$$L_1 + L_2 \geq \frac{F_{(1+2+3)}}{t_w \cdot f_y},$$

kjer je  $F_{(1+2+3)}$  vsota nateznih sil v vrstah vijakov 1, 2 in 3; geometrijske karakteristike so pojasnjene na Slika 14.

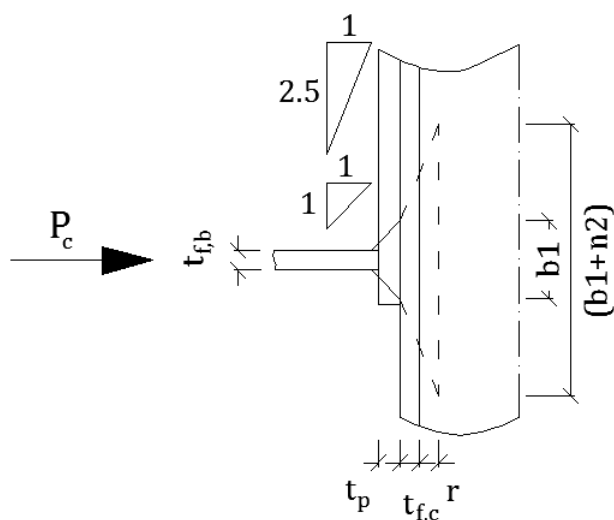


Slika 14: Prikaz primera določitve ustrezne dolžine ojačitve  $L_s$  (Vir: SCI in BSCA, 1997, 36)



### 2.1.4.3 Odpornost tlačne cone spoja

V prečki se formira pod vplivom upogibne obremenitve sila, ki se preko čelne pločevine in pasnice stebra prenese na stojino. Tlačna sila (če ni prisotne osne sile) je po velikosti enaka rezultanti vseh nateznih sil. Obremenitev se razširi na sodelujočo širino. Odpornost stojine stebra določimo kot manjšo med silama nosilnosti in kritično silo uklona. Nosilnost stojine določimo kot odpornost sodelujoče širine. Obtežba se v čelni pločevini raznese pod kotom 45°, v stojini stebra pa v razmerju 1:2,5:

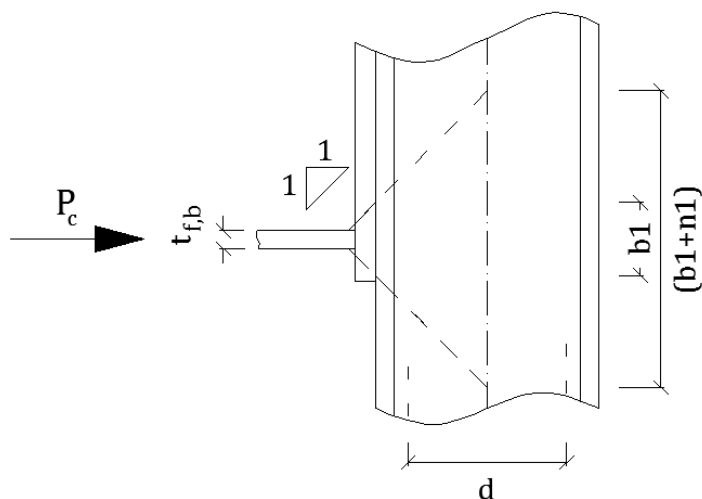


Slika 15: Sodelujoča širina pri nosilnosti stojine stebra (Vir: SCI in BSCA, 1997, 27)

$$P_c = (b_1 + n_2) \cdot t_{wc} \cdot f_y ,$$

kjer je  $P_c$  nosilnost stojine v tlaku,  $t_{fb}$  debelina pasnice prečke,  $t_p$  debelina čelne pločevine,  $a_1$  debelina zvara med pasnico in čelno pločevino,  $b_1 = t_{fb} + 2 \cdot (t_p + \sqrt{2} \cdot a_1)$  sodelujoča širina pod čelno pločevino,  $t_{fc}$  debelina pasnice stebra,  $r$  radija zakrivljenosti prereza stebra,  $b_1 + n_2 = b_1 + 5 \cdot (t_{fs} + r)$  sodelujoča širina v stojini stebra

Kontrolo na uklon stojine stebra izvedemo, tako da upoštevamo sodelujočo širino, ki pripada raznosu obtežbe z naklonom 1:1 na sredini prereza:



Slika 16: Sodelujoča širina pri uklonu stojine stebra (Vir: SCI in BSCA, 1997, 27)

$$P_c = (b_1 + n_1) \cdot t_{wc} \cdot f_y,$$

kjer je  $P_c$  nosilnost stojine stebra na uklon,  $t_{fb}$  debelina pasnice prečke,  $t_p$  debelina čelne pločevine,  $a_1$  debelina zvara med pasnico in čelno pločevino,  $b_1 = t_{fb} + 2 \cdot (t_p + \sqrt{2} \cdot a_1)$  sodelujoča širina pod čelno pločevino,  $t_{fc}$  debelina pasnice stebra,  $r$  radija zakrivljenosti prereza stebra,  $b_1 + n_1 = b_1 + 2 \cdot (t_{fc} + r + \frac{d}{2})$  sodelujoča širina v stojini stebra.

#### 2.1.4.4 Strižna nosilnost spoja

Strižno obremenitev prevzame stojina stebra. Sprva preverimo kompaktnost na strig:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta},$$

kjer so  $\eta = \begin{cases} 1,0 \sim 1,2; S235 - S460 \\ 1,0; > S460 \end{cases}$  faktor, s katerim se poveča plastična strižna nosilnost,

$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$  koeficient, kjer je  $f_y$  v [MPa],  $h_w$  višina stojine stebra in  $t_w$  debelina stojine.

Če je stojina kompaktna, lahko uporabimo kontrolo za plastično strižno nosilnost:

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}},$$

kjer je  $A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f$  strižni prerez vroče valjanega profila,  $\gamma_{M0} = 1,0$  delni faktor odpornosti.

Če se kontrola ne izide, je najpogostejši ukrep umestitev ojačitvenega panela, katerega debelina  $t_{oj}$  ne sme biti manjša od debeline stojine stebra  $t_{oj} \geq t_{wb}$ . Doprinos panela k nosilnosti v strigu upoštevamo tako, da k strižnemu prerezu stebra prištejemo ploščino  $b_{oj} \cdot t_{wb}$ . Če ojačamo panel na obeh straneh, upoštevamo le površino enega panela. Lahko pa uporabimo N, K ali Morrisovo ojačitev.

#### 2.1.4.5 Izračun mejne nosilnosti spoja

Ko imamo določene nosilnosti vsake vrste vijakov  $P_{ri}$ , kakor tudi nosilnosti natezne oz. tlačne cone spoja, lahko določimo mejno nosilnost spoja. Pri mejni nosilnosti določimo sile, ki odpadejo na posamezno vrsto vijakov  $F_{ri}$ . Točno vrednost sile posamezne vrste vijakov pa določimo upoštevajoč ravnotežje sil v horizontalni smeri in vsoto momentov na prijemališče tlačnih sil. Sila  $F_{ri}$  je navzgor omejena s  $P_{ri}$ . Zavedamo se, da je nosilnost na strig predhodno zagotovljena.

- Ravnotežje sil v horizontalni smeri

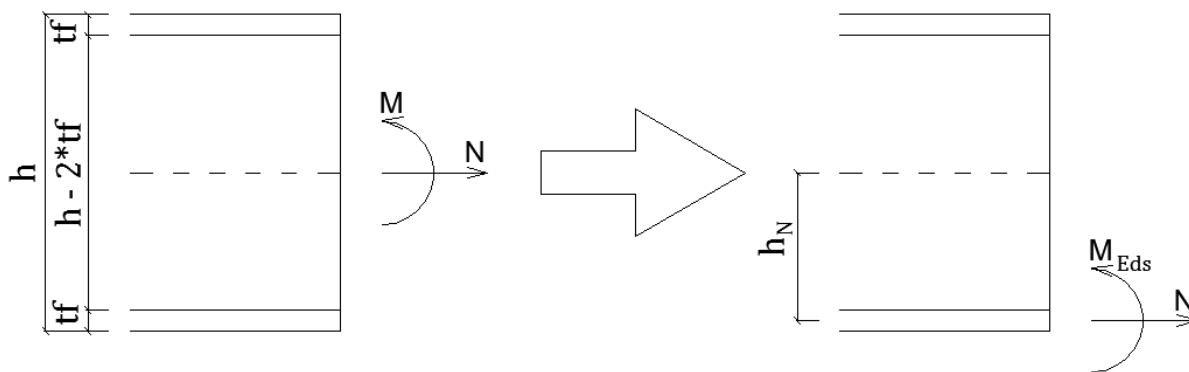
$$\sum F_{ri} + N = F_c,$$

kjer je  $\sum F_{ri}$  vsota vseh končnih sil v vrsti vijakov,  $N$  tlačna osna sila v spoju,  $F_c$  nosilnost tlačne cone spoja, tj. odpornost stojine stebra in pasnice prečke na tlak.

- Vsota momentov na prijemališče tlačne rezultante

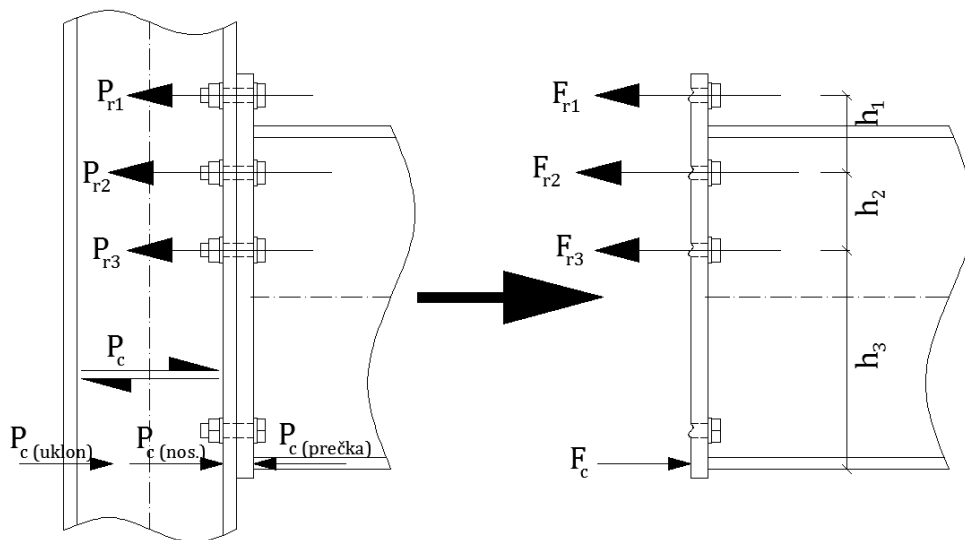
$$M_c = \sum (h_i \times F_{ri}) \geq M_m,$$

kjer je  $h_i$  razdalja od prijemališče tlačne sile do posamezne vrste vijakov,  $F_{ri}$  končna sila v vijaku,  $M_{Eds} = M + N \cdot h_N$  upogibna obremenitev v spoju premeščena v prijemališče tlačne rezultante,  $h_N$  razdalja od srednice prečke od prijemališča tlačne rezultante; v primeru uporabe vute se prijemališče nahaja v središču pasnice vute.



Slika 17: Premaknitev osno-upogibne obremenitve v prijemališče rezultante tlačnih sil.

Sile v vrstah določimo na podlagi njihovih nosilnosti. Za vsako vrsto mora veljati  $F_{ri} \leq P_{ri}$ , kjer je  $P_{ri}$  nosilnost posamezne vrste. Če ob zagotavljanju ravnotežja sil v horizontalni smeri opazimo, da je vsota nosilnosti posameznih vrst vijakov večja od nosilnosti tlačne cone spoja, zmanjšujemo sile v vijakih. Pričnemo pri najnižji vrsti v nategu in nadaljujemo navzgor. Vendar ravnotežje mora biti zagotovljeno. Na Slika 18 imamo na levi strani podane nosilnosti posameznih vrst vijakov in tlačne cone, na desni pa razporeditev končnih sil v spoju. Na skici je predstavljen primer nesimetričnega spoja, medtem ko je v Sloveniji priporočeno dimenzioniranje simetričnih spojev



Slika 18: Določitev sil v vijakih pri izračunu mejne nosilnosti spoja. (Vir: SCI in BSCA, 1997, 30)

#### 2.1.4.6 Dimenzioniranje vijakov na interakcijo strig-upogib

V tem poglavju je predstavljena konservativna kontrola dimenzioniranja vijakov na vertikalni strig. Nosilnost v vertikalni strig določimo, tako da upoštevamo  $n_s$  vijakov, ki so obremenjeni samo v strigu in jih pri računu upogibne nosilnosti spoja ne upoštevamo. Poleg tega pa imamo še  $n_i$  vijakov, ki so

obremenjeni v obeh smereh – v normalni in prečni. Pri slednjih upoštevamo samo 40% nosilnosti na strig, saj v tem območju ni redukcije nosilnosti vijaka v nategu. Veljati mora:

$$V_{Ed} \leq n_s \cdot P_{ss} + n_t \cdot P_{ts},$$

kjer je  $V_{Ed}$  projektna strižna obremenitev,  $P_{ss}$  nosilnost posameznega vijaka, ki je obremenjen samo v prečni smeri; nosilnost je najmanjša izmed nosilnosti v strigu in na bočni pritisk v pasnici stebra oz. v vezni pločevini,  $P_{ts}$  nosilnost posameznega vijaka, ki je obremenjen tako v prečni smeri kot tudi v vzdolžni. Nosilnost  $P_{ts}$  je enaka najmanjši izmed naslednjih vrednosti: 40% nosilnosti v strigu, nosilnost na bočni pritisk v pasnici stebra oz. v vezni pločevini.

Zgornja kontrola je navedena v [4]. Mogoče je malce neobičajno, da kombiniramo nosilost v nategu z nosilnostjo na bočni pritisk. Namesto zgornje kontrole lahko uporabimo naslednjo, ki jo zasledimo v [1]. Tukaj preverimo najbolj obremenjeni vijak:

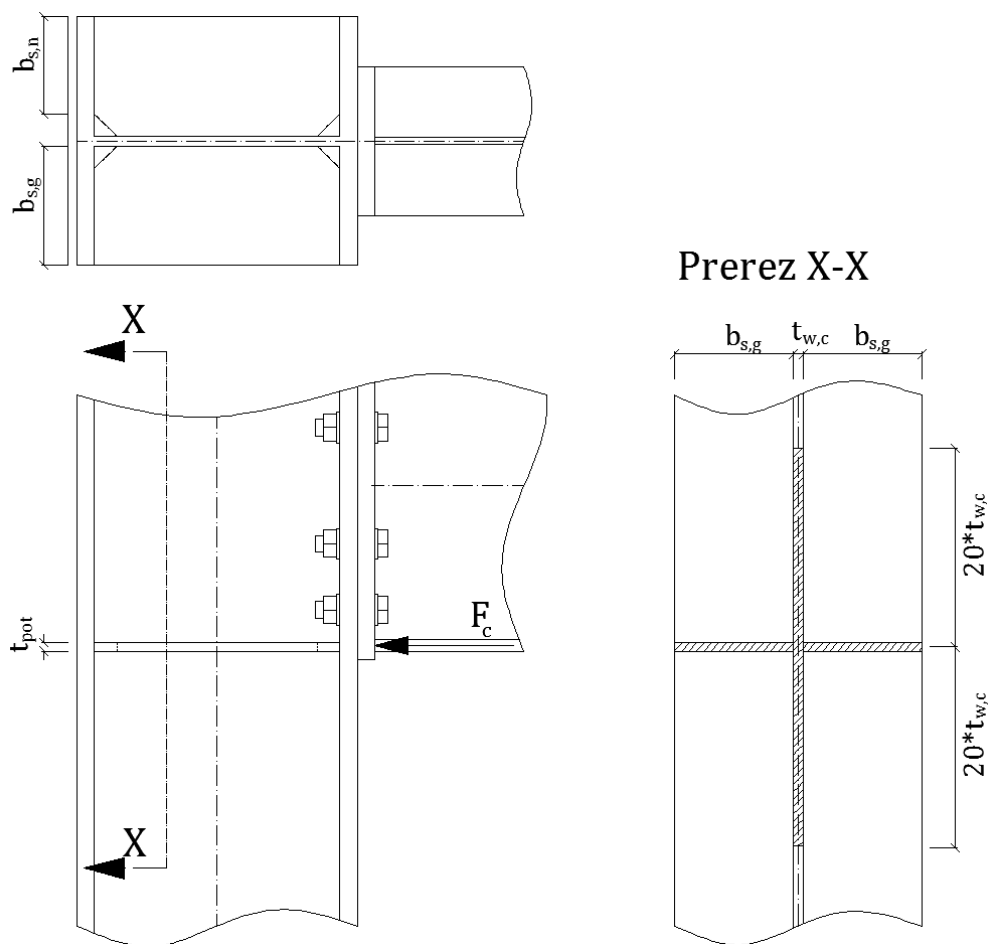
$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0,$$

kjer je  $F_{v,Ed} = V_{Ed} / m$  strižna obremenitev posameznega vijaka,  $m$  število vseh vijakov,  $F_{t,Ed}$  natezna obremenitev najbolj obremenjenega vijaka,  $F_{v,Rd}$  strižna nosilnost vijaka in  $F_{t,Rd}$  natezna nosilnost vijaka.

#### **2.1.4.7 Dimenzioniranje ojačitev v tlačni coni**

Če pri določanju mejne nosilnosti spoja ugotovimo, da stojina stebra ne zagotavlja ustrezne odpornosti rezultanti tlačnih sil, moramo umestiti tlačno ojačitev. Zagotoviti moramo, da je ojačitev sama sposobna prenesti 80% celotne obremenitve.

Bruto širina ojačitve  $b_{sg}$  ne sme biti večja od  $19 \cdot t_{pot}$ , kjer je  $t_{pot}$  debelina ojačitve. Neto širina ojačitve je definirana kot dolžina, na kateri ojačitev nalega na pasnico stebra. Od bruto širine se razlikuje zaradi izrezov pri zaokrožitvi prereza stebra in dela ojačitve, ki presega širino pasnice stebra.



Slika 19: Prikaz ojačitve stebra v tlačni coni (Vir: SCI in BSCA, 1997, 32)

Ojačitev dimenzioniramo tako, da zadovoljimo naslednjim kontrolam stabilnosti in nosilnosti ojačitve:

$$P_{uklon} = (A_w + A_{sg}) \cdot \chi(\bar{\lambda}) \cdot f_y$$

$$P_{nos1} = A_{sn} \cdot f_y + [(b_1 + n_2) \cdot t_{wc} \cdot f_y], \text{ kjer je } (b_1 + n_2) \text{ razdalja definirana v 2.1.4.3}$$

$$P_{nos2} = \frac{A_{sn} \cdot f_y}{0,8}, \text{ kjer je}$$

$A_w = 40 \cdot t_{wc}^2$  dopustna ploščina stojine stebra pri določanju uklonske odpornosti, glej Slika 19

$A_{sg} = 2 \cdot b_{sg} \cdot t_{pot}$  bruto prerez ojačitve

$A_{sn} = 2 \cdot b_{sn} \cdot t_{pot}$  neto prerez ojačitve, ki nalega na pasnico stebra

$\chi(\bar{\lambda})$  redukcijski faktor, ki ga odčitamo iz uklonske krivulje c, kjer je vitkost  $\bar{\lambda} = \frac{0,7 \cdot L}{93,9 \cdot \varepsilon \cdot r_y}$

$L = D_c - 2 \cdot T_c$  dolžina ojačitve,  $D_c$  višina prereza stebra,  $T_c$  debelina pasnice stebra

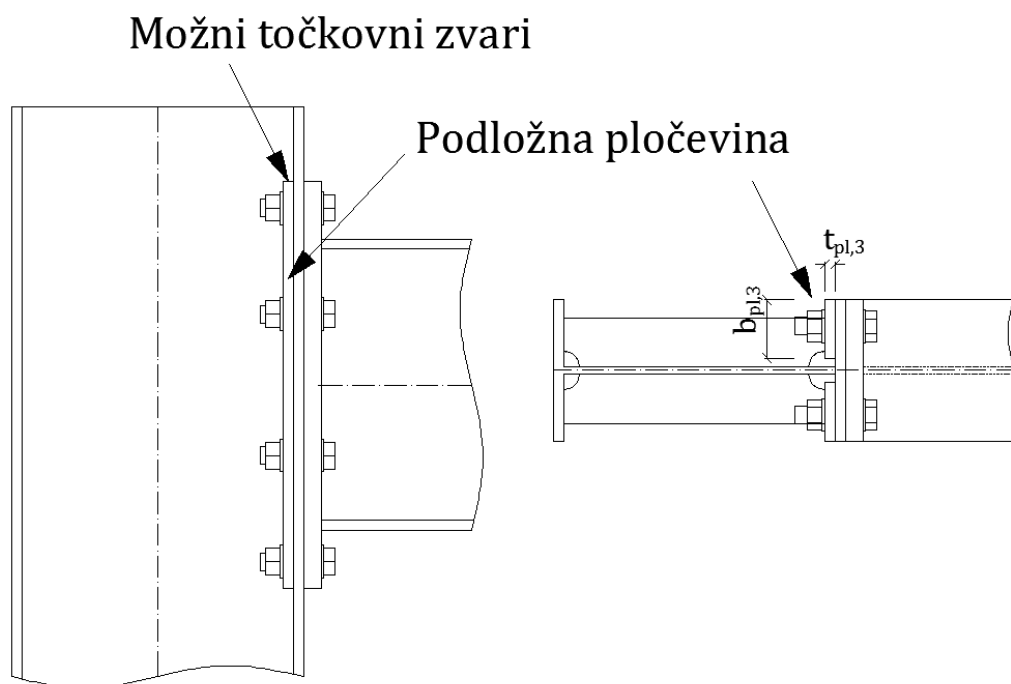
$r_y$  vztrajnostni radij efektivnega prereza ojačitve

$f_y$  meja tečenja materiala

Uporabimo kotne zware. Zvare med ojačitvijo in pasnico stebra projektiramo kot polno nosilne; sicer je priporočena debelina 6 mm. Zvari med ojačitvijo in stojino stebra morajo pri spojih z eno prečko prenesti tlačno silo v pasnici prečke. Pri spojih, kjer se stikata nosilca na nasprotnih straneh stebra, morajo prenesti vsoto tlačnih rezultatov obeh prečk, če sili delujeta v isti smeri. Če pa sili delujeta v nasprotni smeri, dimenzioniramo zware na večjo (v absolutnem smislu) od tlačni sil.

#### 2.1.4.8 Dimenzioniranje podložnih pločevin pasnice stebra

S podložnimi pločevinami na zadnji strani pasnice stebra povečamo njeno nosilnost. Ta način ojačevanja se uporablja predvsem pri manjših prerezih stebrov s tankimi pasnicami. Podložne pločevine izvedemo, tako da so pričvrščene skupaj z vijaki; ali pa jih točkovno privarimo.



Slika 20: Prikaz ojačitve pasnice stebra (Vir: SCI in BSCA, 1997, 34)

Nosilnost pasnice povečamo samo pri načinu porušitve 1 (glej poglavje 0). Pri načinu porušitve 2 ojačitvena pločevina ne prispeva k nosilnosti, saj se le-ta ne plastificira. Pri tretjem načinu pa upoštevamo samo natezno nosilnost vijakov. Pri prvem načinu porušitve dodatno nosilnost zaradi ojačitvene pločevine upoštevamo prek izrazov:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd} + 2 \cdot M_{pl,3}}{m}, \text{ kjer je}$$

$$M_{pl,3} = \frac{l_{eff} \cdot t_{pl,3}^2 \cdot f_y}{4} \text{ plastični odpornostni moment ojačitvene pločevine,}$$

$t_{pl,3}$  debelina ojačitvene pločevine.

Širina ojačitvene pločevine  $b_{pl,3}$  ne sme biti manjša od konca pasnice do zaokrožitve pasnice v stojino. Pločevino moramo umestiti, tako da se natanko prilega začetku zaokrožitve. Dolžina pločevine mora presegati začetno in končno vrsto vijakov za vsaj dva premera vijakov.

#### 2.1.4.9 Dimenzioniranje dodatne pločevine stojine

Debelina dodatne pločevine  $t_{oj}$  ne sme biti manjša od debeline stojine. Pločevina mora biti narejena iz istega materiala kot steber. Pločevina naj bo s kotnimi zvari privarjena po celotnem obodu. Debelina zvara je enaka  $a = \sqrt{2} \cdot t_{oj} / 2$ , tako da je krak zvara enak debelini pločevine. Če dodatno pločevino uporabimo za povečanje natezne odpornosti, naj bo vertikalni zvar na natezni strani izveden tako, da zapolni prostor zakrivljenosti med pločevino in pasnico stebra. V tem primeru mora biti širina pločevine enaka višini stojine stebra. Občasno so potrebni tudi čepasti zvari. Širina pločevine naj bo večja od  $b_{oj} \geq d - 2 \cdot t_{oj}$ , kjer je  $d$  višina stojine stebra. Dolžina pločevine naj bo večja od  $L_{oj} \geq h_{pl} + (b_1 + n_2)$ , kjer je  $h_{pl}$  ... višina prereza prečke,  $b_1 + n_2$  ... dolžina tlačne cone v stojini stebra (glej 2.1.4.3) in  $L_{oj}$  ... dolžina vezne pločevine. Pri tem moramo paziti pri primerih, ko uporabimo vuto. Vodilo pri določanju dolžine pločevine je, da pločevina sega preko natezne in tlačne cone v stojini stebra.

Pri računu natezne odpornosti stojine stebra (glej poglavje 2.1.4.2) upoštevamo efektivno debelino stojine stebra  $t_{eff}$ , ki je enaka pri enojni pločevini  $t_{eff} = 1,5 \cdot t_{wc}$ , pri dvojni pa  $t_{eff} = 2,0 \cdot t_{wc}$ . Simbol  $t_{wc}$  označuje debelino stojine stebra. Pri izračunu tlačne odpornosti (glej poglavje 2.1.4.3) vzamemo iste vrednosti za  $t_{eff}$ . Opazimo, da lahko z ojačitvenim panelom nosilnost tlačne oz. natezne cone povečamo kvečjemu za 50% pri enojni ojačitvi in za 100% pri dvojni.



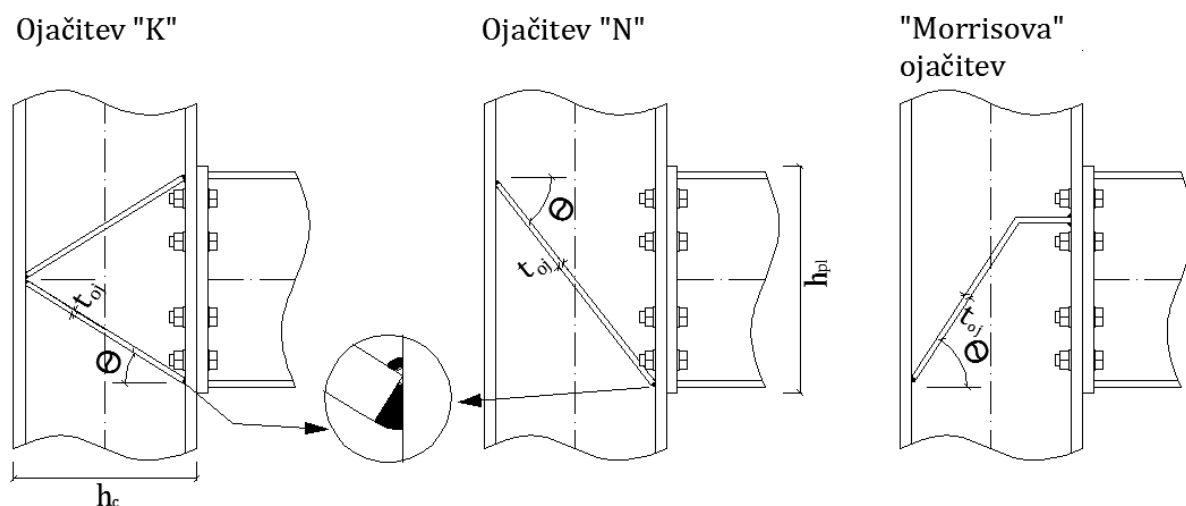
Odpornost ojačane stojine na strig izračunamo z izrazom:

$$P_v = 0,6 \cdot f_y \cdot A_v,$$

kjer je  $A_v = t_w \cdot (d + b_{oj})$  kombiniran strižni prerez; opazimo, da strižni prerez ni odvisen od debeline dodatne pločevine. Zato imata enojna ali dvojna pločevina isti vpliv na strižno odpornost. Vendar moramo upoštevati dejstvo, da debelina vezne pločevine ne sme biti manjša od debeline stojine stebra.

#### 2.1.4.10 Dimenzioniranje diagonalne strižne ojačitve

V tem poglavju smo obravnavali tri tipe diagonalne strižne ojačitve; ojačitve K, N in Morrisova.



Slika 21: Prikaz treh tipov strižne ojačitve K, N in Morris. (Vir: SCI in BSCA, 1997, 34)

Površina ojačitve mora izpolnjevati pogoj:

$$A_{sg} \geq \frac{F_v - P_v}{f_y \cdot \cos \theta},$$

kjer so  $A_{sg} = 2 \cdot b_{sg} \cdot t_{oj}$  površina ojačitev na obeh straneh,  $b_{sg}$  širina ojačitve na obeh straneh,  $t_{oj}$  debelina ojačitve,  $F_v$  strižna obremenitev stojine,  $P_v$  strižna odpornost neojačane stojine stebra (glej poglavje 2.1.4.4),  $f_y$  manjša od meje tečenja stebra oz. pločevine,  $\theta$  naklon ojačitvene pločevine.

K ojačitev uporabimo v primeru, ko je višina spoja v primerjavi z višino prereza stebra velika. V fazi dimenzioniranja moramo zagotoviti ustrezen prostor za montažo vijakov. Spodnja polovica K ojačitve doprinese k tlačni odpornosti stojine stebra. Zato jo moramo preveriti tudi kot tlačno ojačitev (glej

poglavje 2.1.4.7). Če moramo oblikovati simetrični spoj, seveda preverimo obe polovici ojačitve kot tlačni.

N ojačitev je umeščena v spoj tako, da deluje v tlaku, da se izognemo nevšečnostim pri zagotavljanju ustreznega prostora za montažo natezних vijakov. Če je prisotna tlačna ojačitev, potem kontrola N ojačitve kot tlačne ni potrebna; sicer pa.

Ojačitev Morris je učinkovita glede zagotavljanja dodatne strižne nosilnosti. Primernejša je predvsem za večje profile. Poleg tega ima veliko prednost – izognemo se težavam pri zagotavljanju prostora za montažo, ki lahko nastopijo pri zgoraj omenjenih ojačitvah. Horizontalni del ojačitve lahko služi kot natezna ojačitev. Dolžina le-tega naj znaša vsaj 100 mm, da je omogočena montaža vijakov.

Zvari, ki spajajo ojačitev in pasnico stebra, naj bodo oblikovani, tako kot je prikazano na Slika 21. Zvar naj bo kombiniran na obeh straneh s skupno debelino enako debelini pločevine ojačitve. Pri ojačitvi Morris naj bodo zvari, ki spajajo horizontalni del ojačitve s pasnico stebra oblikovani, tako da sta zagotovljena pogoja za neto površino ojačitve iz poglavja 2.1.4.2.

#### **2.1.4.11 Dimenzioniranje zvarov**

Zvari med natezno pasnico in čelno pločevino so lahko polno nosilni; lahko jih dimenzioniramo na natezno nosilnost pasnice prečke  $= b_{fb} \cdot t_{fb} \cdot f_y$ , kjer je  $b_{fb}$  ... širina pasnice in  $t_{fb}$  ... debelina pasnice.

Za večino manjših ali srednje velikih nosilcev bodo zvari simetrični in polno nosilni. Kadar krak zvara preseže 12 mm, tj. debelina zvara večja od 8,5 mm, uporabimo delno penetrirane čelne K zware. V ekonomskem smislu se verjetno bolje obnesejo polno penetrirani čelni zvari. Prehod med večjimi zvari na pasnici in manjšimi na stojini izvedemo na stiku zaokrožitve s stojino prereza. Tak pristop je morda malce konservativen, vendar v mejnem stanju nosilnosti (MSN) se lahko pojavi raztezek čelne pločevine med pasnicama prečke v vertikalni smeri. Tako se na natezno pasnico prenese še večja obremenitev, kot je predvidena nosilnost sosednjih vijakov. Prav zaradi tega je priporočljivo umestiti polno nosilne zware, ki prenesejo silo, katera je enaka ali večja natezni nosilnosti pasnice prečke.

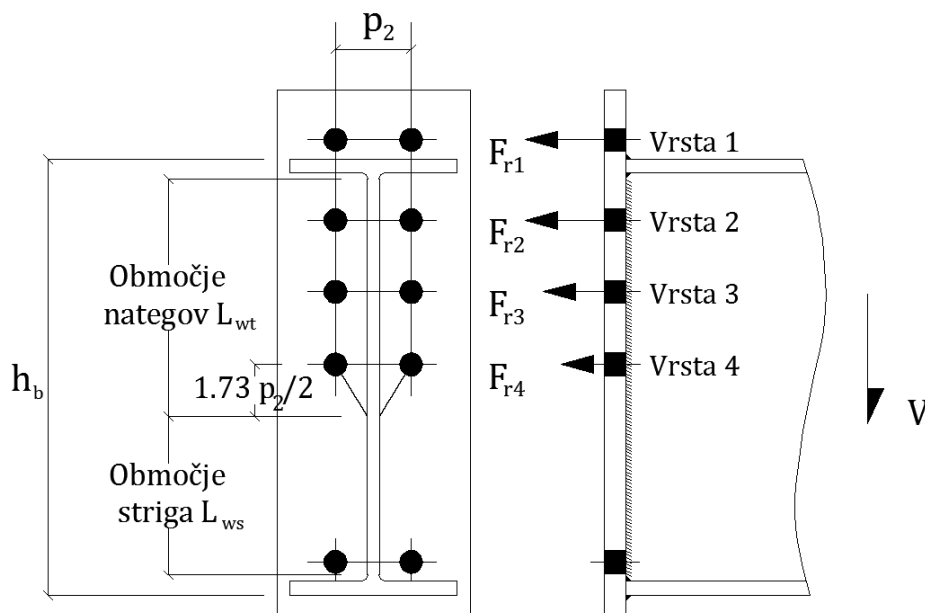
Polno nosilna zvara na pasnici lahko izvedemo kot:

- simetrična kotna zvara na obeh straneh pasnice, katerih vsota dolžine krakov je enaka debelini pasnice,
- par delno penetriranih kotnih zvarov,
- polno penetrirane čelne zware (V, K, J in dvojni J).

Pri tlačni pasnici, kjer je zagotovljen prenos tlačne sile iz pasnice nosilca na čelno pločevino, zadostujejo že kotni zvari 8 mm. V primerih, kjer je debelina pasnice manjša ali enaka 12 mm, lahko predvidimo zware debeline 6 mm. Če prenos tlačne obtežbe ni zagotovljen, tj. v primeru uporabe vute, mora biti spoj dimenzioniran tako, da prenese celotno tlačno komponento  $F_c$ .

Priporočljivo je, da so zvari med stojino in vezno pločevino polno nosilni. Za stojine tanjše od 11,3 mm to dosežemo z zvari debeline 8 mm po celotni dolžini. V tem primeru nadaljnji izračun zagotavljanja odpornosti na interakcijo striga in upogiba ni potreben. Za debelejšje stojine lahko zware ob stojini razdelimo na dve območji (glej Slika 22):

- območje nategov – umestimo polno nosilna zvara, katerih vsota dolžin krakov ni manjša od debeline stojine  $t_{wb}$ . Zvari morajo segati do točke, ki je za  $\frac{1,73 \cdot p_2}{2}$  (kjer je  $p_2$  horizontalna razdalja med vijaki) nižje od zadnje vrste vijakov.
- območje striga – zvari v območju striga imajo nosilnost  $P_{sw} = 2 \cdot a \cdot f_{vwd} \cdot L_{ws}$ , kjer je  $a$  debelina zvara,  $f_{vwd}$  projektna strižna trdnost zvara,  $L_{ws} = D_b - 2 \cdot (T_b + r_b) - L_{wt}$  dolžina strižnega območja,  $D_b$  višina prečke,  $T_b$  debelina pasnice prečke,  $r_b$  radij zakrivljenosti prereza prečke,  $L_{wt}$  dolžina natezne cone.



Slika 22: Prikaz razdelitve stojine prečke na območje natega in striga (Vir: SCI in BSCA, 1997, 40)

#### 2.1.4.12 Dimenzioniranje vute

Vute uporabljamo, zato da zagotovimo daljšo ročico za vijake v nategu in za sam nosilec. Vute dimenzioniramo, tako da lahko brez težav izvedemo varjenje in da nosilec lahko prenese upogibno, strižno in osno obremenitev. Zato se pri dimenzioniranju vute držimo naslednjih načel:

- Uporabimo isti material, kot je uporabljen pri osnovnem nosilcu.
- Debelina pasnice vute ne sme biti manjša kot pasnica prečke.
- Debelina stojine vute ne sme biti manjša kot stojina prečke.
- Naklon pasnice vute  $\theta$  ne sme biti manjši od  $45^\circ$ .

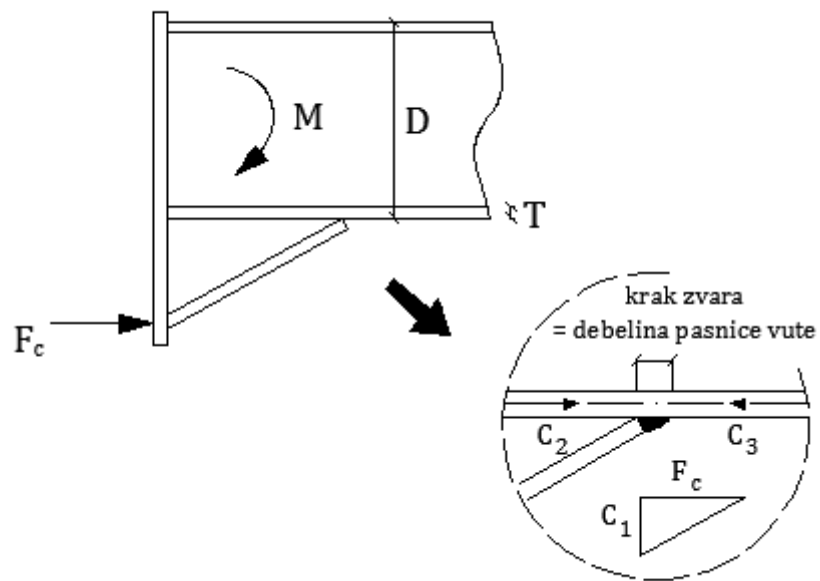
Pasnica vute in kadar je potrebno, tudi njen spodnji del stojine sodelujeta pri prevzemu tlačne obremenitve. Dimenzioniranje pasnice poteka na isti način kot dimenzioniranje pasnice prečke na tlačno obremenitev, kjer upoštevamo 40% dodatne nosilnosti (glej poglavje 2.1.4.3). Razporeditev sil v vuti je odvisna od njene oblike. Prav tako moramo preveriti, če stojina nosilca prevzame vertikalno

komponento  $C_1 = \frac{F_c}{\tan \theta}$ , ki je posledica oblike vute. Slednje opravimo tako, da upoštevamo vse kontrole, ki smo jih navedli v poglavju 2.1.4.3 za stojino stebra.

Zvari, ki spajajo pasnico vute in čelno pločevino naj bodo dimenzionirani po navodilih za zware v tlaku, ki smo jih navedli v poglavju 2.1.4.11. Zvar med pasnico vute in prečko naj bo po debelini enak debelini pasnice prečke. Za obremenitev stojine vute privzamemo silo  $C_2 = C_3 - F_c$ , kjer je

$C_3 = \frac{M}{D-T}$  (glej Slika 23). Pri dimenzioniranju zvarov stojine vute po navadi pogojem nosilnosti

zadostimo že z zvari debeline 6 mm. Kjer pogoji korozijske varnosti in estetike dovoljujejo, lahko uporabimo prekinjene kotne zware.



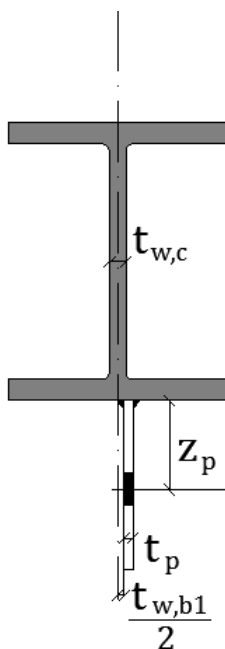
Slika 23: Prikaz vute in razporeditev sil (Vir: SCI in BSCA, 1997, 41)

### 3 ČLENKAST SPOJ Z VEZNO PLOČEVINO

Členkast spoj z vezno pločevino izvedemo, tako da vezno pločevino privarimo na podpirajoči steber v delavnici; medtem ko nosilec privijamo na gradbišču. Je vrsta spoja, ki omogoča izredno hitro gradnjo.

Rotacijsko kapaciteto spoja zagotavljamo predvsem z ovalizacijo lukenj za vijake v vezni pločevini in/ali v stojini prečke. Nekaj lahko prispeva tudi strižna deformacija vijakov. V ta namen običajno take spoje projektiramo, tako da je nosilnost vijakov na bočni pritisk kritična kontrola. Vendar lahko upoštevajoč [1] projektiramo členkaste spoje, tako da sledimo priporočenim pravilom za detajliranje, s katerimi zagotovimo potrebno rotacijsko kapaciteto. Vendar moramo biti pri dimenzioniranju spojev posebno previdni.

Priključitev ukrivljenih, nagnjenih nosilcev ali nosilcev z rahlim odmikom v tej izvedbi ni težavna. V splošnem spoj izvedemo, tako da je os podprtega nosilca v liniji z osjo podpirajočega elementa. Vezno pločevino izvedemo z rahlim odmikom na stran. Na gradbišču se pogosto zgodi, da ni jasno vidno, na katero stran vezne pločevine se priključi prečka. Zato je priporočljivo dosledno uporabljati isti način priključevanja nosilcev kakor tudi označiti kontaktne površine.

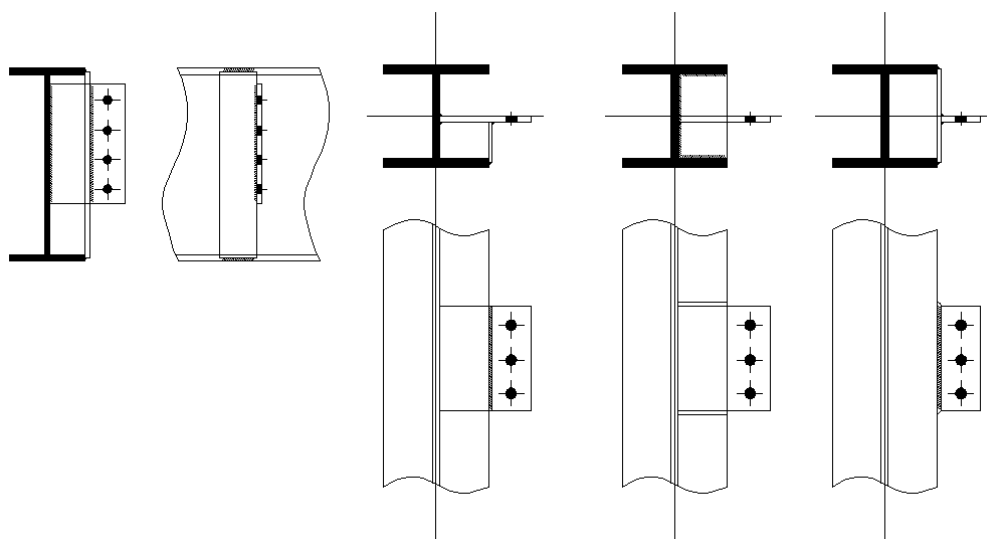


Slika 24: Prikaz izvedbe členkastega spoja, kjer je  $t_{w,b1}$  ... debelina stojine podpirajočega elementa

(Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 108)

Vezne pločevine definiramo kot kratke, če velja  $\frac{t_p}{z_p} \geq 0,15$ ; kjer je  $z_p$  razdalja od podpirajočega

elementa do sredine prve vrste vijakov in  $t_p$  debelina vezne pločevine (pri tem moramo ločiti  $z_p$  in  $z$  - glej Slika 27). Če vezna pločevina ne izpolnjuje zgornjega pogoja, pripada dolgim. Če imamo primer spoja, kjer preko kratke vezne pločevine priključujemo nosilec na stojino stebra, je lahko montaža težavna. V izogib nevšečnostim odrežemo del spodnje pasnice nosilca, saj le-tega ne potrebujemo pri prevzemu obremenitve. Pri dolgih veznih pločevinah moramo kontrolirati tudi uklon pločevine. Dolgih veznih pločevin ne smemo uporabljati pri bočno nezavarovanih nosilcih, saj lahko v spoju pride do ekstremnega in kompleksnega obnašanja. Lahko jih uporabimo le v primeru, ko je ustrezen odziv dokazan s testi ali povečamo njihovo togost z naslednjimi ukrepi:



Slika 25: Prikaz izvedbe ojačitev dolgih veznih pločevin. Levo primer spoja nosilec-nosilec, desno trije primeri ojačitev spoja steber-nosilec (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 108)

### 3.1.1 Priporočila za geometrijo

S temi priporočili glede detajlov zagotovimo potrebno fleksibilnost in rotacijsko kapaciteto členkastega spoja:

- Višina vezne pločevine mora znašati vsaj  $0,6 \cdot h$ , kjer je  $h$  višina nosilca, da zagotovimo ustrezno torzijsko podporo nosilcu.
- Debelina vezne pločevine ali stojine nosilca mora biti manjša od  $0,42 \cdot d$  za jeklo S355 oz. manjša od  $0,50 \cdot d$  za jeklo S275;  $d$  je premer vijakov.
- Uporabimo neprednapete vijake kvalitete 8.8 v standardnih okroglih luknjah premera  $d_0$ .

- Robne razdalje naj znašajo vsaj  $2 \cdot d_0$ .
- Uporabimo polno nosilne kotne zware.

Prvo navodilo služi temu, da lahko za primere, kjer nosilec ni dodatno bočno podprt, upoštevamo uklonsko dolžino nosilca  $1,0 \cdot l$ . Zadnja dva omogočata ustrezno rotacijsko kapaciteto.

### 3.1.2 Postopek projektiranja

Postopek projektiranja, predstavljen v tem poglavju, se nanaša na spoje, kjer je vezna pločevina privarjena na stojino oz. pasnico stebra, na stojino podpirajočega nosilca in na obod stebra z votlim prerezom. Ustrezno kompaktnost prerezov zagotavljamo z izpolnjevanjem pogojev za razmerje širine/premera in debeline:

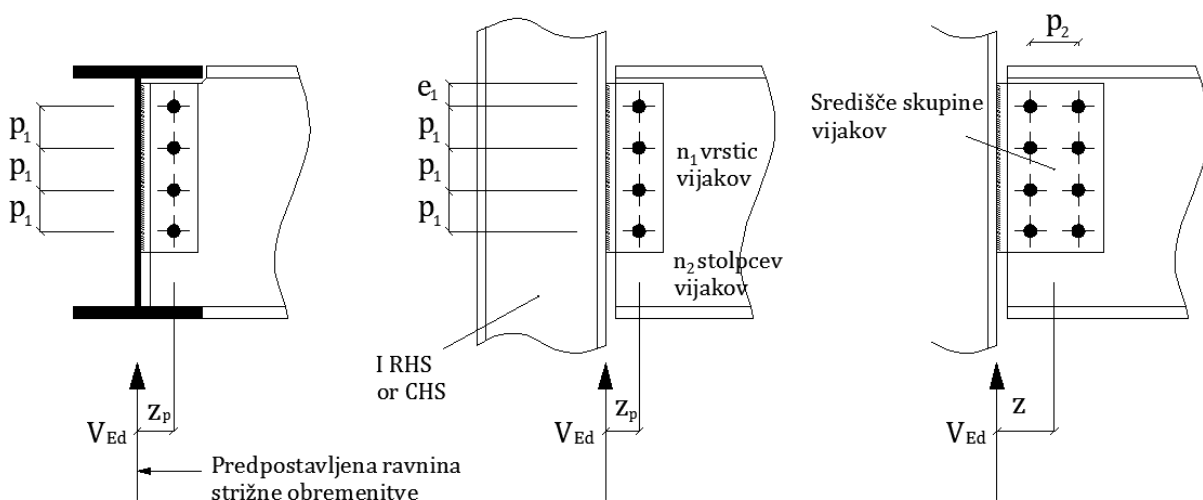
- I, SHS in RHS profili  $\frac{c_w}{t_w} \leq 40 \cdot \varepsilon$
- Cevi – CHS profili  $\frac{d}{t} \leq 70 \cdot \varepsilon^2$

Če hočemo v tem poglavju opisano metodo uporabiti za nosilce, katerih višina znaša več kot 610 mm, mora biti zadoščeno naslednjim pogojem: razmerje med razponom in višino nosilca mora biti manjše ali enako 20, razmik med podpirajočim in podprtim elementom mora biti večji od 20 mm in vertikalna razdalja med najvišjim in najnižjim vijakom mora znašati manj kot 530 mm.

Za zagotavljanje minimalne natezne sile v horizontalnih vezeh - 75 kN, mora biti v spoju steberprečka, kjer je vezna pločevina privarjena na pasnico stebra, debelina vezne pločevine več kot 6 mm in umeščena morata biti vsaj dva vijaka M20, kvalitete 8.8. Za zagotavljanje večjih sil je potrebno izvesti dodatne kontrole.



### 3.1.2.1 Kontrola na strig



Slika 26: Prikaz izvedbe členkastega soja, kjer so označene količine, ki jih uporabimo pri računu strižne odpornosti vijakov (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 114)

Kontrolo na strig pogosto uporabimo, da določimo prvi približek števila vijakov  $m$ . Strižno odpornost posameznega vijaka določimo s spodnjim izrazom:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}},$$

kjer so  $\alpha_v = \begin{cases} 0,6; & \text{za duktilne vijake 4.6, 5.6 in 8.8} \\ 0,5; & \text{za neduktilne vijake 4.8, 5.8, 6.8 in 10.9} \end{cases}$ ,  $f_{ub}$  natezna trdnost vijakov,  $A_s$

ploščina vijaka skozi navoje,  $\gamma_{M2} = 1,25$  delni faktor odpornosti.

Uporabimo ploščino vijaka skozi navoje, saj je priporočena uporaba vijakov brez stebila (v smislu standardizacije spojev). Prav tako smo z dosledno uporabo ploščine skozi navoje na varni strani, saj nismo povsem prepričani, kjer poteka ravnina prestriga.

Zavedati se moramo, da se kljub modeliranju spoja kot členka pojavi v ravnini vijakov nominalni moment. S povečevanjem odmika vijakov od podpirajočega elementa, kakor tudi s povečevanjem vrst vijakov, se poveča tudi ročica, kar rezultira v povečanju nominalnega momenta. Da zajamemo omenjeni vpliv, moramo uporabiti naslednje razširjene izraze kontrole na strig:

$$V_{Ed} \leq V_{v,Rd}$$

$$V_{Rd} = \frac{m \cdot F_{v,Rd}}{\sqrt{(1 + \alpha \cdot m)^2 + (\beta \cdot m)^2}}, \text{ kjer je}$$

$m = n_1 \times n_2$  število vijakov ( $n_1$  število vrst vijakov,  $n_2$  število stolpcev)

$$\alpha = \begin{cases} 0; n_2 = 1 \\ \frac{z \cdot p_2}{2 \cdot l}; n_2 = 2 \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{6 \cdot z}{n_1 \cdot (n_1 + 1) \cdot p_1}; n_2 = 1 \\ \frac{z \cdot p_1}{2 \cdot l} \cdot (n_1 - 1); n_2 = 2 \end{cases}$$

$$l = \frac{n_1}{2} \cdot p_2^2 + \frac{1}{6} \cdot n_1 \cdot (n_1^2 - 1) \cdot p_1^2$$

### 3.1.2.2 Kontrola nosilnosti na bočni pritisk

Poleg upoštevanja priporočil za geometrijo, je smotrno spoj dimenzionirati, tako da je kontrola na bočni pritisk merodajna, saj je strižna porušitev neduktilna. Tudi tukaj z razširjenimi izrazi upoštevamo vpliv nominalnega momenta v ravnini težišča vijakov.

$$V_{Ed} \leq V_{b,Rd}$$

$$V_{Rd} = \frac{m \cdot F_{b,Rd}}{\sqrt{(1 + \alpha \cdot m)^2 + (\beta \cdot m)^2}}, \text{ kjer je}$$

$\alpha$ ,  $\beta$  in  $m$  glej poglavje 3.1.2.1

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_{u,b} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \text{ nosilnost na bočni pritisk enega vijaka}$$

$$k_1 = \text{MIN}(1,4 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5; 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5)$$

$$\alpha_b = \text{MIN} \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3 \cdot d_0} \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ 1,0 \end{array} \right.$$

$d$  premer vijaka

$t = \text{MIN}(t_w, t_p)$  manjša izmed debeline stojine prečke oz. vezne pločevine.

Nosilnost na bočni pritisk enega vijaka lahko izračunamo za zunanji in za notranji vijak posebej. Prav tako lahko določimo nosilnost v horizontalni in vertikalni smeri posebej. Tukaj je predstavljen izračun najmanjše nosilnosti izmed vseh vijakov. Tako smo na varni strani.

### 3.1.2.3 Strižna in upogibna odpornost vezne pločevine

Strižno nosilnost vezne pločevine določimo kot minimalno vrednost med strižno odpornostjo bruto prereza, neto prereza in strižnim iztrgom:

- Vezna pločevina v strigu – bruto prerez

$$V_{Rd,g} = h_p \cdot t_p \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

- Vezna pločevina v strigu – neto prerez

$$V_{Rd,g} = A_{v,net} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2}}$$

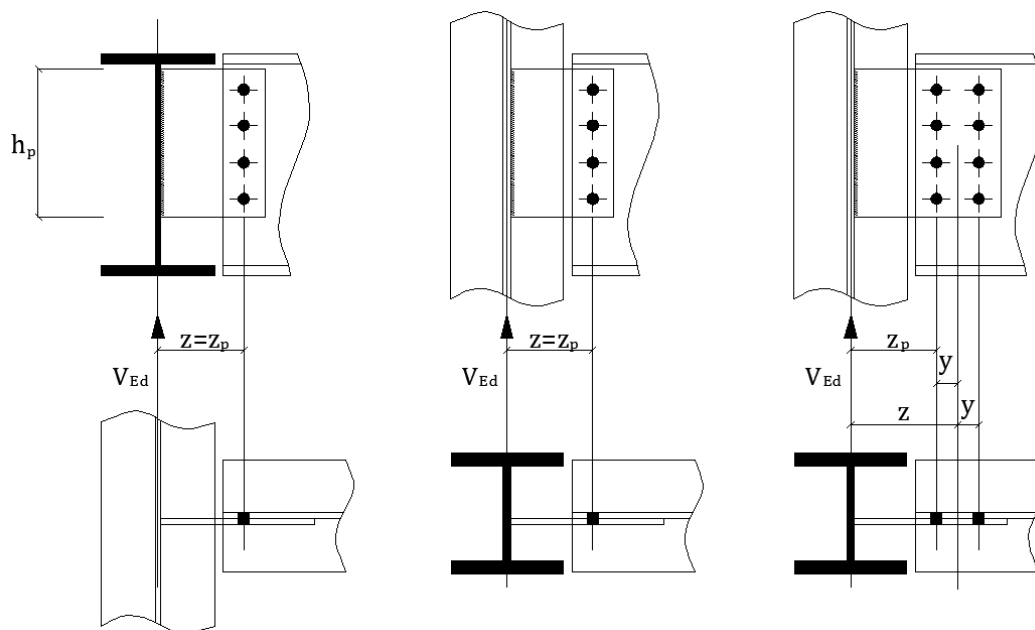
- Strižni iztrg vezne pločevine

$$V_{Rd,b} = 0,5 \cdot \frac{f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y \cdot A_{nv}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}, \text{ kjer je } A_{nt} \text{ ploščina neto prereza v nategu in } A_{nv} \text{ ploščina}$$

neto prereza vezne pločevine v strigu.

Upogibno odpornost zagotovimo s kontrolama upogibne elastične nosilnosti  $V_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{z \cdot \gamma_{M0}}$ , kjer je

$W_{el} = \frac{t_p \cdot h_p^2}{6}$  elastični odpornostni moment vezne pločevine,  $z, h_p$  glej sliko Slika 27.



Slika 27: Prikaz ročice nominalnega momenta  $z$  in razdalje od čela podpirajočega elementa do prve vrste vijakov  $z_p$  (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 108)

Če je strižna obremenitev manjša od polovice nosilnosti bruto preseza na strig  $V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{Rd,g}$ , ni potrebno upoštevati interakcije strig-upogib. Poleg elastične upogibne nosilnosti kontroliramo še bočno zvrnitev vezne pločevine. Občutljive na uklon so le dolge končne pločevine, tj.  $\frac{z_p}{t_p} > 0,15$ . V

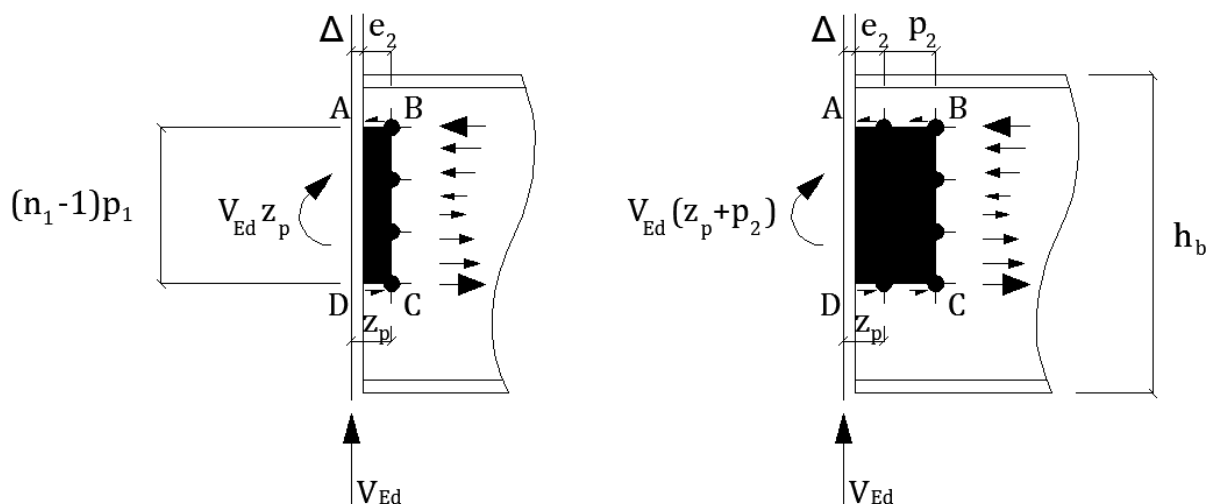
tem primeru je odpornost definirana kot:

$$V_{Rd} = \text{MIN} \left( \chi_{LT} \cdot \frac{W_{el} \cdot f_y}{0,6 \cdot z \cdot \gamma_{M0}}; \frac{W_{el} \cdot f_y}{z \cdot \gamma_{M0}} \right)$$

Upogibni uklon lahko poračunamo v skladu s postopkom za bočno zvrnitev upogibno obremenjenih elementov s konstantnim prečnim presekom (glej poglavje 6.3.2 v [2]). Redukcijski faktor  $\chi_{LT}(\lambda_{LT})$  odčitamo iz uklonske krivulje d.

#### 3.1.2.4 Stojina nosilca obremenjena z upogibom in strigom

Strižno odpornost stojine nosilca preverimo na isti način kot pri vezni pločevini, ki jo določimo kot najmanjšo izmed nosilnosti med bruto in neto presekom ter strižnim iztrgom. Pri tem moramo upoštevati zmanjšani prerez prečke v primeru spoja nosilec-nosilec, ko odrežemo del zgornje ali pa tudi spodnje pasnice.



Slika 28: Prikaz modela za kontrolo interakcije strig – upogib pri spoju z vezno pločevino (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 112)

Pri kontroli interakcije strig – upogib velja, da za kratke vezne pločevine ( $\frac{t_p}{z_p} \geq 0,15$ ) kontrole ni potrebno izvajati. Pri spojih z dolgimi veznimi pločevinami obravnavamo strižno obremenitev  $V_{Ed}$  in nominalni upogibni moment  $M_0$ ; kjer je  $M_0 = V_{Ed} \cdot z_p$  za spoje z enim stolpcem vijakov oz.  $M_0 = V_{Ed} \cdot (z_p + p_2)$  za spoje z dvema stolpcema vijakov. Stojino stebra v območju spoja razdelimo na odseke med točkami ABCD (glej Slika 28). Odseka AB in CD sta v strigu in območje BC v upogibu. Kontrola, ki jo izvajamo:

$$M_0 \leq M_{c,BC,Rd} + V_{pl,AB,Rd} \cdot (n_1 - 1) \cdot p_1,$$

kjer je  $n_1$  število vrstic vijakov v spoju,  $p_1$  vertikalna razdalja med vijaki,  $V_{pl,AB,Rd}$  strižna nosilnost odseka AB,  $M_{c,BC,Rd}$  upogibna nosilnost odseka BC.

Za nizko stopnjo strižne obremenitve, tj.  $V_{BC,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,BC,Rd}$ , velja:

$$M_{c,BC,Rd} = \frac{f_y \cdot t_w}{6 \cdot \gamma_{M0}} \cdot ((n_1 - 1) \cdot p_1)^2,$$

Za visoko stopnjo strižne obreme:

$$M_{c,BC,Rd} = \frac{f_y \cdot t_w}{6 \cdot \gamma_{M0}} \cdot ((n_1 - 1) \cdot p_1)^2 \cdot \left( 1 - \left( \frac{2 \cdot V_{BC,Ed}}{V_{pl,BC,Rd}} \right)^2 \right)$$

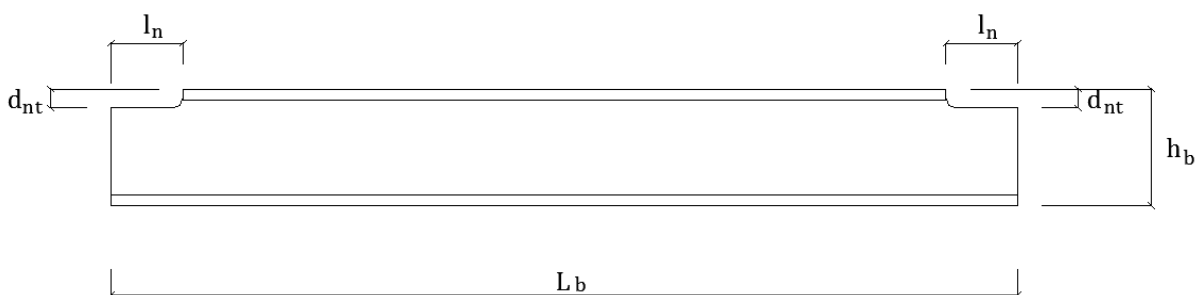
$V_{BC,Ed}$  je strižna obremenitev odseka BC in je enaka sorazmernemu deležu, ki odpade na celotno stojino. Določimo jo v razmerju dolžin odseka BC in višine prereza.  $V_{pl,BC,Rd}$  je strižna nosilnost odseka BC. V primeru, ko imamo dve vrsti vijakov, oslabljen prerez (vsaj ena zareza na zgornji oz. spodnji pasnici) in zareza sega preko drugega stolpca vijakov  $l_n > (e_{2,b} + p_2)$ , moramo upoštevati oslabitve prereza in nosilnost prereza ustrezno zmanjšati.

### 3.1.2.5 Lokalna stabilnost oslabljenega prereza nosilca zaradi izrezanih delov pasnice

Če je nosilec ustrezno bočno podprt, potem ni potrebno izvajati dodatnih kontrol. Sicer morajo dolžina izrezanega dela pasnice  $l_n$ , višina izrezanega dela  $d_{nt}$ , višina nosilca  $h_b$  in debelna stojine nosilca  $t_{w,b}$  biti v ustreznem razmerju, da se lokalni problemi glede stabilnosti ne pojavijo. Če omenjene geometrijske lastnosti prereza niso v ustreznem razmerju, potem moramo umestiti ustrezne ojačitve.

### 3.1.2.6 Stabilnost celotnega nosilca na bočno zvrnitev upoštevajoč oslabljene dele pasnice

Če je nosilec ustrezno podprt, potem kontrola ni potrebna. Sicer je v tem poglavju opisan postopek kontrole stabilnosti celotnega elementa za nosilce, ki imajo oslabljeno le zgornjo pasnico. Če sta dolžina in višina izreza na obeh koncih različni, vzamemo večji dimenziji.



Slika 29: Definicija geometrijskih karakteristik nosilca z izrezanima deloma zgornje pasnice (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 112)

Nosilec kontroliramo na bočno zvrnitev v skladu s poglavjem 6.3.2 v [2], kjer izračunamo elastični kritični moment bočne zvrnitve  $M_{cr}$  in upoštevamo efektivno dolžino nosilca  $L_e$ . Podan je izraz za

določitev efektivne dolžine, vendar za primere, kjer velja  $\frac{l_n}{L_b} < 0,15$  in  $\frac{d_{nt}}{h_b} < 0,20$  (glej Slika 29).

Nosilce, ki ne izpolnjujejo omenjenih pogojev, moramo smatrati kot elemente s »T« prerezom ali jih ojačati.

$$L_E = L_b \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot l_n}{L_b} \cdot (K^2 + 2 \cdot K) \right)^{1/2}, \text{ kjer je}$$

$$K = \frac{K_0}{\lambda_b}, \lambda_b = \frac{U \cdot V \cdot L_b}{i_z}, \text{ kjer sta konservativni vrednosti } U = 0,9 \text{ in } V = 1,0$$

$$K_0 = \begin{cases} 1,1 \cdot g_0 \leq 1,1 \cdot K_{\max}; \text{ za } \lambda_b < 30 \\ g_0 \leq K_{\max}; \text{ za } \lambda_b \geq 30 \end{cases}, \text{ kjer sta } g_0 \text{ in } K_{\max} \text{ količini podani tabelarično v}$$

odvisnosti od razmerja  $\frac{l_n}{L_b}$  in od vrste prereza.

### 3.1.2.7 Podporni element v strigu

V tem poglavju obravnavamo lokalno strižno nosilnost podpirajočega dela stebra oz. nosilca. To kontrolo izvajamo le v primerih, ko je vezna pločevina privarjena na stojino stebra oz. primarnega nosilca ali steno stebra votlega prereza. Izberemo tako vezno pločevino, da zagotovimo še varnost proti strižnemu preboju; tj. debelina vezne pločevine  $t_p$  in debelina stojine podpirajočega elementa  $t_2$  morata biti v takem razmerju, da plastifikacija v vezni pločevini nastopi preden se vezna pločevina iztrže iz stojine ali stene podprtega elementa.

Lokalno strižno nosilnost primarnega elementa preverimo z izrazi  $\frac{V_{Ed}}{2} \leq F_{Rd}$ ,  $F_{Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$  in

$A_v = h_p \cdot t_2$ , kjer je  $h_p$  višina vezne pločevine in  $t_2$  debelina stojine oz. pasnice podpirajočega elementa.

Varnost proti preboju stojine ali stene zagotovimo z izpolnjevanjem naslednjega izraza

$$t_p \leq t_2 \cdot \frac{f_{u,2}}{f_{y,p} \cdot \gamma_{M2}} \text{ oz. } t_p \leq t_2 \cdot \frac{f_{u,2} \cdot t_p \cdot h_p^2}{V_{Ed} \cdot \phi \cdot z \cdot \gamma_{M2}}, \text{ kjer se indeks 2 nanaša na podporni element in indeks}$$

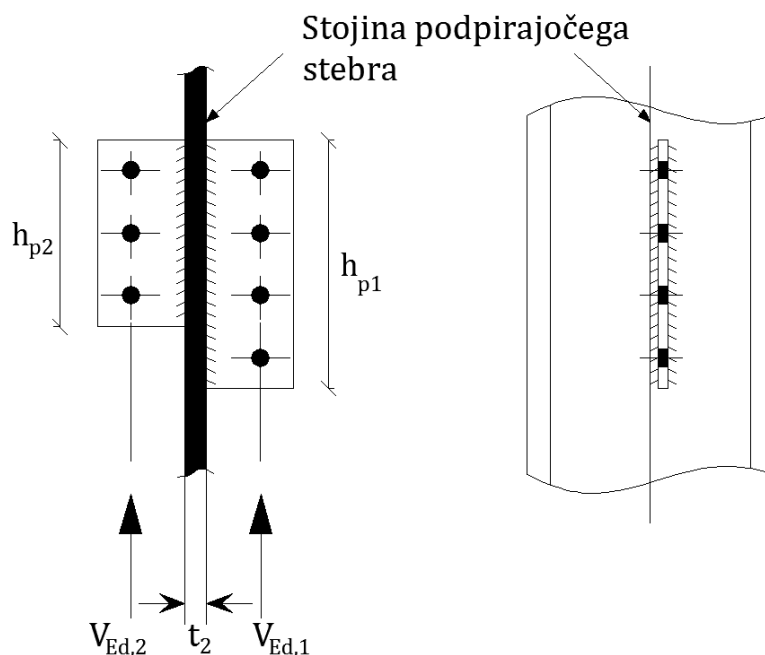
p na vezno pločevino. Na tak način zagotovimo, da se vezna pločevina plastificira, preden nastopi preboj pločevine v stojini primarnega elementa. Preboj stojine je krhka porušitev, zato moramo zagotoviti, da ni merodajen.

Če imamo primer, kjer sta v spoju dva podprta elementa, prevedemo skupno obremenitev iz obeh prečk na učinkovito dolžino, ki je enaka višini manjše vezne pločevine (glej Slika 30). Ostalo poteka po istem postopku kot prej.

$$V_{Ed,tot} = \left( \frac{V_{Ed,1}}{h_{p,1}} + \frac{V_{Ed,2}}{h_{p,2}} \right) \cdot h_{p,min},$$

kjer je  $V_{Ed,i}$  strižna obremenitev prečke,  $h_{p,i}$  višina vezne pločevine  $i$ -te prečke,

$$h_{p,min} = \text{MIN}(h_{p,1}, h_{p,2}).$$



Slika 30: Primer, kjer sta podprti dve prečki na nasprotni strani pasnice stebra. (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 112)

### 3.1.2.8 Zagotavljanje robustnosti konstrukcije - horizontalne vezi

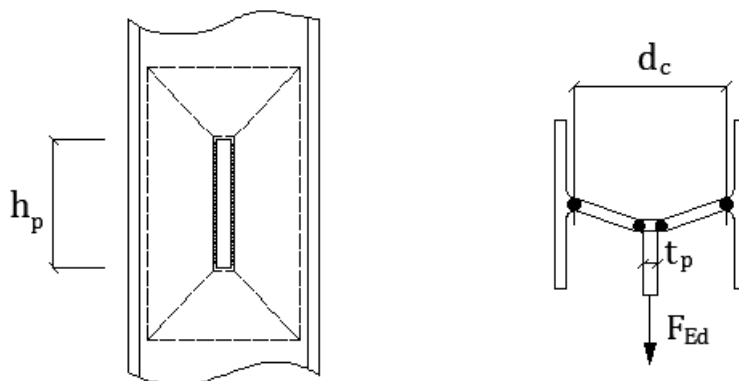
Minimalna natezna sila v horizontalnih vezeh znaša  $F_{Ed} = 75kN$ . V ta namen mora spoj imeti vsaj dva vijaka velikosti M20 in kvalitete 8.8 ter debelino vezne pločevine vsaj 6 mm. Tukaj nas zanimajo nosilnost na iztrg pločevine  $F_{Rd,b}$ , natezna nosilnost neto prereza vezne pločevine  $F_{Rd,n}$ , strižna nosilnost vijakov  $F_{v,u}$  in nosilnost na bočni pritisk  $F_{b,Rd,u}$ . Natezna sila mora biti manjša od vseh navedenih nosilnosti  $F_{Ed} \leq F_{Rd,u} = \text{MIN}(F_{Rd,b}, F_{Rd,n}, F_{v,u}, F_{b,Rd,u})$ .

Iste kontrole izvedemo še na stojini prečke. Seveda kontrole striga vijakov ni potrebno zopet izvesti, saj smo jo že prej. Glede zvarov zadostuje, da je izpolnjena kontrola  $a \geq 0,6 \cdot t_p$ .

Preveriti moramo še, ali se ob obremenitvi spoja z natezno silo plastificira območje v bližini stojine vroče valjanega prereza stebra ali stena votlega prereza oz. cevi. Odpornost določimo po naslednjih izrazih:



- Stojina vroče valjanega prereza



Slika 31: Plastifikacija stojine vroče valjanega prereza (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 122)

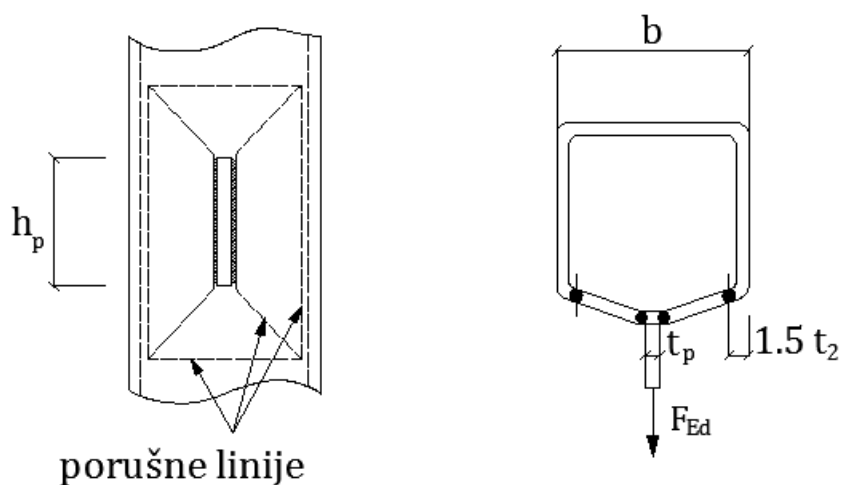
$$F_{Rd,u} = \frac{8 \cdot M_{pl,Rd,u}}{\gamma_{Mu} \cdot (1 - \beta_1)} \cdot (\eta_1 + 1,5 \cdot (1 - \beta_1)^{0,5})$$

$$M_{pl,Rd,u} = \frac{f_u \cdot t_2^2}{4}, \quad \eta_1 = \frac{h_p}{d_c}, \quad \beta_1 = \frac{t_p + 2 \cdot s}{d_c}$$

kjer je  $t_2$  debelina stojine stebra,  $d_c$  višina stojine nosilca (med zaokrožitvama),  $s = 1,4 \cdot a$  krak zvara.

V zgornjem izrazu zajamemo s faktorjem 1,5 tlačno osno obremenitev prereza.

- Stena votlega pravokotnega profila



Slika 32: Plastifikacija stene votlega prereza (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 123)

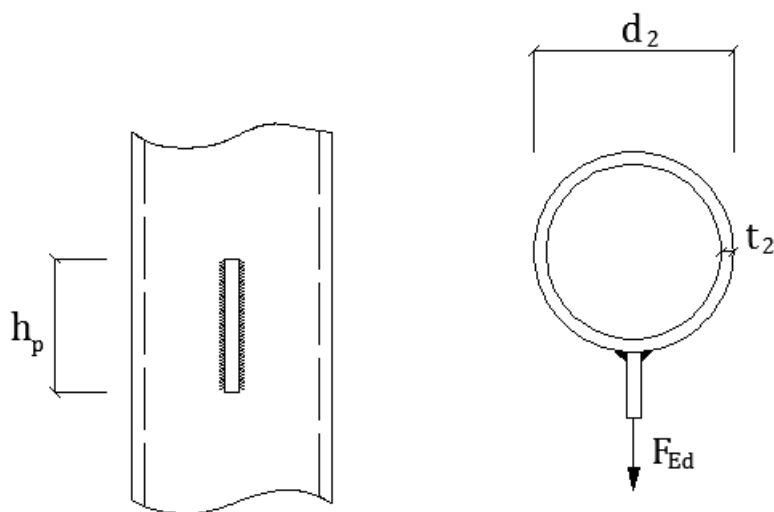
$$F_{Rd,u} = \frac{8 \cdot M_{pl,Rd,u}}{\gamma_{Mu} \cdot (1 - \beta)} \cdot (\eta + 1,5 \cdot (1 - \beta)^{0,5})$$

$$M_{pl,Rd,u} = \frac{f_u \cdot t_2^2}{4}, \quad \eta = \frac{h_p}{b - 3 \cdot t_2}, \quad \beta = \frac{t_p + 2 \cdot s}{b - 3 \cdot t_2}$$

kjer je  $t_2$  debelina stojine stebra,  $b$  zunanja širina votlega pravokotnega prereza,  $s = 1,4 \cdot a$  krak zvara.

Faktor 1,5 v zgornjem izrazu je zaradi tega, ker dovoljujemo tlačno osno obremenitev prereza.

- Stena cevi



Slika 33: Plastifikacija stene cevi (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 124)

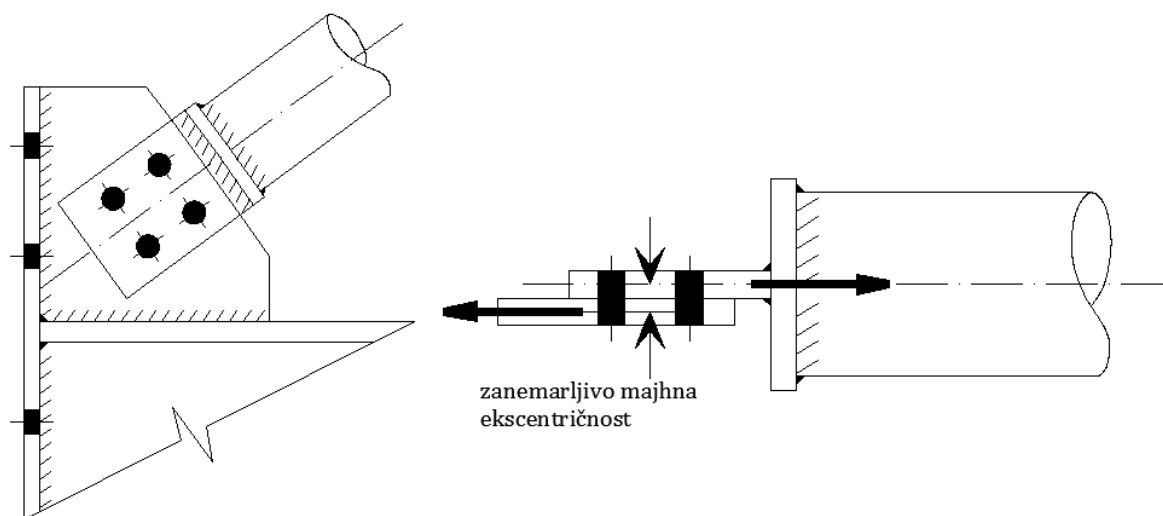
$$F_{Rd} = \frac{5 \cdot f_u \cdot t_2^2 \cdot 0,67}{\gamma_{Mu}} \cdot (1 + 0,25 \cdot \eta),$$

kjer je  $\eta = \frac{h_p}{d_2}$ ,  $t_2$  debelina stene cevi,  $d_2$  zunanji premer cevi.

Faktor 0,67 v zgornjem izrazu je zaradi tega, ker dovoljujemo tlačno osno obremenitev prereza.

#### 4 PRIKLJUČEK DIAGONALNEGA ELEMENTA NA VEZNO PLOČEVINO

V tem poglavju obravnavamo predvsem priključek diagonale povezja na vezno pločevino. Prerezi diagonalnih elementov so različni. Lahko so kotniki, U profili, I profili, votli prerezi itd. Elementi v povezju lahko delujejo tako v nategu kot tudi v tlaku; odvisno od vitkosti elementa. Vezna pločevina je privarjena na steber, na nosilec ali pa na nosilec in njegovo čelno pločevino.



Slika 34: Prikaz tipičnega priključka nateznega elementa na vezno pločevino (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 108)

Konstrukcije z diagonalnimi povezji analiziramo, tako da se silnice obremenitev sekajo v sečiščih srednjih linij konstrukcijskih elementov. Če želimo izvesti tako konstrukcijo, kjer bi dejansko bila upoštevana zgornja predpostavka, se to lahko odraža v zelo velikih veznih pločevinah. Še posebej, če so diagonale pod zelo velikim ali majhnim kotom. Zato je včasih bolj prikladno, da dimenzioniramo bolj kompaktne spoje in lokalno preverimo vpliv ekscentričnosti, ki se pojavijo v taki konstrukciji.

Slika 34 kaže ekscentričnost v samem spoju. Opazimo, da je omenjena ekscentričnost res majhna. V takih primerih slednjo zanemarimo.

Take spoje izvajamo z neprednapetimi vijaki v standardnih luknjah. V takih primerih pride do rahlega zdrsa v spoju. Tudi ta zdrsa po navadi zanemarimo. Če do tega zdrsa ne sme priti, smo primorani uporabiti prednapete vijake.

Splošni algoritem dimenzioniranja priključka diagonalnega elementa na vezno pločevino:

- Določiti pot prenosa obtežbe skozi spoj.

- Spoj oblikovati, tako da zagotovimo nominalno členkasti spoj.
- Vključiti vplive večjih ekscentričnosti.
- Kontrolirati komponente spoja.

#### 4.1.1 Kotniki

Sprva preverimo bruto  $N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$  in neto prerez elementa  $N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$  v skladu s

poglavjem 6.2.3(2) v [2]. Upoštevati moramo ekscentričnost in učinke razmikov ter robnih razdalj vijakov na nosilnost nesimetričnih prerezov in na nosilnost simetričnih prerezov, ki so nesimetrično privijačeni. Slednji primer je primer priključitve kotnika preko enega kraka. V poglavju 3.10.3 v [1] je opisana metoda, kjer na efektivni neto površini upoštevamo prerez kot centrično obremenjen.

Pri kotnikih, priključenih preko enega kraka, natezno odpornost določimo z izrazom:

- 1 vijak:  $N_{u,Rd} = \frac{2 \cdot (e_2 - 0,5 \cdot d_0) \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$
- 2 vijaka:  $N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$
- 3 vijaki:  $N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$

V zgornjih izrazih sta  $\beta_2$  in  $\beta_3$  faktorja, ki sta odvisna od  $p_1$  in ju določimo iz spodnje preglednice. Vmesne vrednosti določimo z interpolacijo.  $A_{net}$  je neto prerez kotnika. Če obravnavamo kotnik, ki ni enakokraki in je priključen preko krajšega kraka, za  $A_{net}$  upoštevamo neto ploščino prereza enakokrakega kotnika, kjer sta kraka enaka manjšemu.

Preglednica 2: Redukcijska faktorja  $\beta_2$  in  $\beta_3$

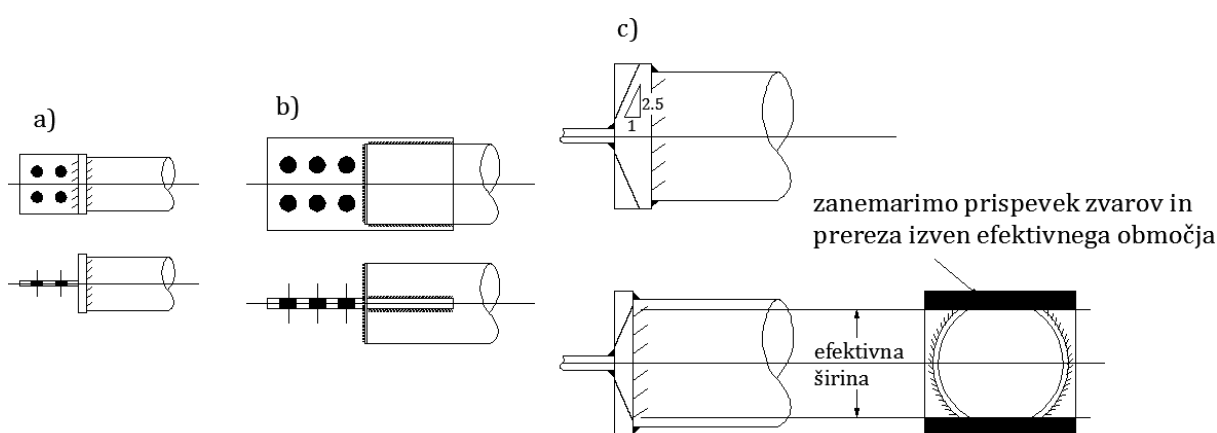
Razmik $p_1$	$\leq 2,5 \cdot d_0$	$\leq 5,0 \cdot d_0$
$\beta_2$ za 2 vijaka	0,4	0,7
$\beta_3$ za 3 vijake ali več	0,5	0,7

Tak način projektiranja uporabimo tudi za U profile, kjer prerez obravnavamo kot sestavljen prerez iz dveh kotnikov. Pri U profilih se pogosto zgodi, da je kontrola za nosilnost prereza merodajna. To pa

zato, ker je debelina stojine precej tanka. Izbira večjega profila ni najboljša rešitev, zato raje privarimo v predelu spoju dodatno pločevino, ki ojači stojino U profila. Pločevino lahko dimenzioniramo, tako da prevzame celotno osno obremenitev. Seveda moramo zagotoviti polnonosilne zware.

#### 4.1.2 Votli profili

Votle profile lahko uporabljamo v povezjih kot natezne ali tlačne elemente. Pogosto jih priključujemo preko »T« elementa, ki ga izrežemo iz standardnega nosilca ali pa posebej zvarimo iz pločevin. »T« elementi so primerni predvsem za nosilce, ki so manj obremenjeni. Pri večjih obremenitvah so bolj primerne pločevine, ki jih vrežemo v nosilec in privarimo. Sicer to zahteva večjo stopnjo obdelave.



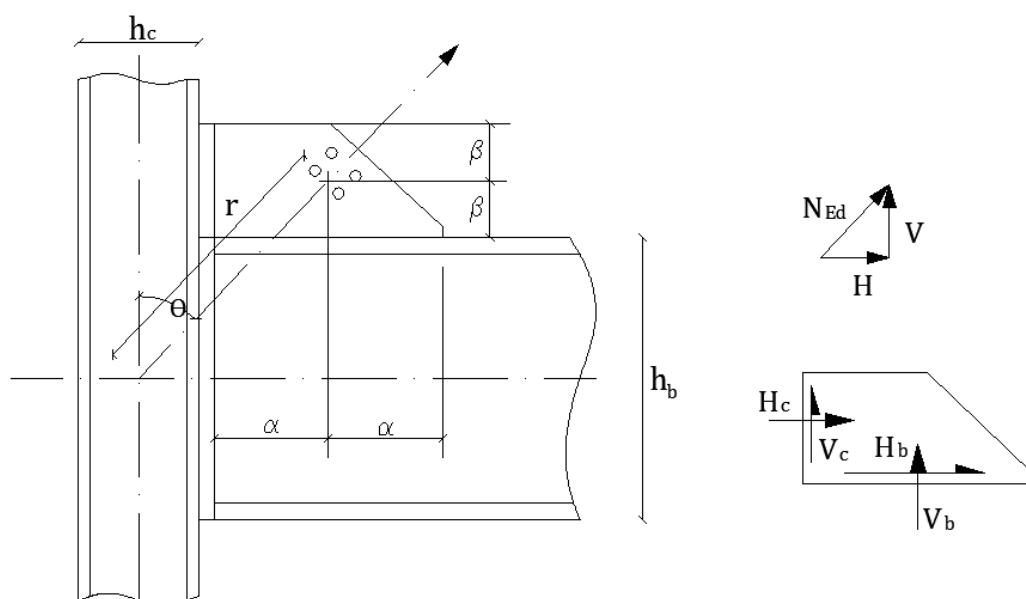
Slika 35: Prikaz priključka elementa preko »T« elementa a), preko vezne pločevine b) in raznos obremenitve v »T« elementu c) (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 247)

V »T« priključnih elementih predpostavimo raznos obtežbe pod kotom 2,5:1. Če je pločevina tanjša, moramo upoštevati efektivni prerez (glej Slika 35 c). Zaradi tega moramo pri kontroli zvarov upoštevati le zware znotraj območja, ki sicer potekajo po celotnem obodu elementa. Prav tako moramo pri kontroli prereza upoštevati le del prereza znotraj učinkovitega območja.

#### 4.1.3 Vezna pločevina

Če dimenzioniramo vezno pločevino, ki je prav tako v tlaku, je priporočljivo, da je podprta na dveh robovih in primerno kompaktna. Vozliščne pločevine naj bodo debele, saj ni ekonomskega razloga, da bi bile tanjše. Za določitev zvarov na vozliščni pločevini, ki je podprta na dveh robovih, upoštevamo dejstvo, da horizontalno komponento sile ( $N_{Ed} \cdot \sin \theta$ ) prevzamemo s horizontalnim robom pločevine. Analogno storimo za vertikalni rob ( $N_{Ed} \cdot \cos \theta$ ). Debelejši zvar, ki je potreben za prevzem obremenitve na enem od robov, naj bo zavarjen po celotni dolžini obeh robov.

Če spoj oblikujemo, tako da srednjica diagonalnega elementa poteka skozi presečišče srednjih linij stebra in prečke (glej Slika 36), potem se izognemo dodatnim obremenitvam zaradi ekscentričnosti.



Slika 36: Priključek diagonalnega elementa na vozliščno pločevino, kjer ni prisotne ekscentričnosti  
(Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 248)

Zvare dimenzioniramo po naslednjih izrazih (definicija količin parametrov na Slika 36):

$$H_b = N_{Ed} \cdot \frac{\alpha}{r}, \quad H_c = N_{Ed} \cdot \frac{h_c}{2 \cdot r}, \quad \text{kjer velja } H_b + H_c = H$$

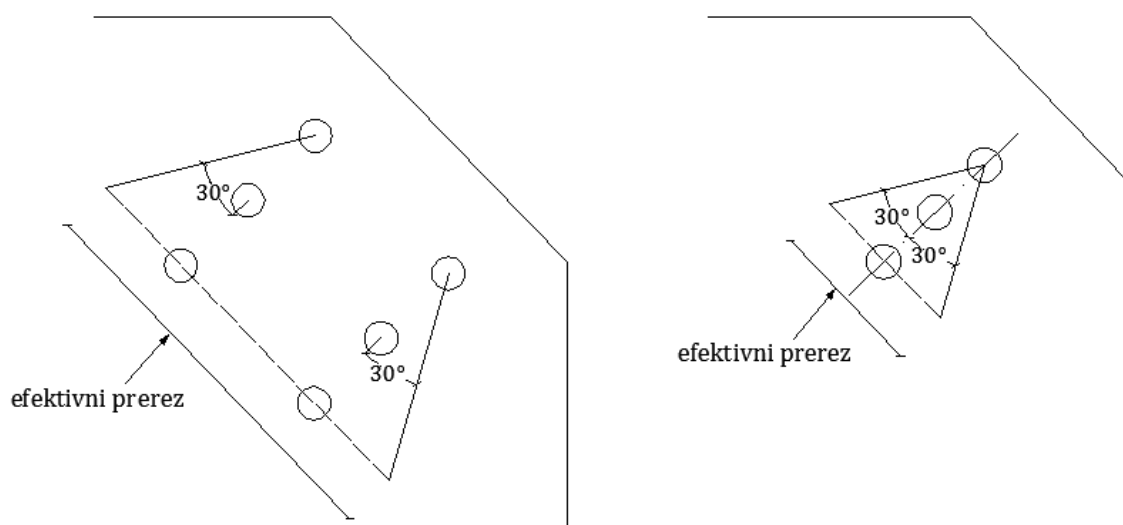
$$V_b = N_{Ed} \cdot \frac{h_b}{2 \cdot r}, \quad V_c = N_{Ed} \cdot \frac{\beta}{r}, \quad \text{kjer velja } V_b + V_c = V$$

Če obravnavamo primer, kjer je vozliščna pločevina oblikovana, tako da srednjica priključenega elementa poteka skozi stičišče prečke in stebra, morajo biti zvari projektirani na horizontalno oz. vertikalno komponento obremenitve, kakor je navedeno zgoraj. Vendar pa moramo pri dimenzioniranju stebra upoštevati dodatni moment  $M_c$ , ki je produkt ekscentričnosti – tj. polovice višine stebra in vertikalne komponente obremenitve. Prav tako moramo dodatno upogibno obremenitev  $M_b$  upoštevati še pri prečki. Ta je enaka produktu polovice višine nosilca in horizontalne komponente obremenitve. Poleg tega se pojavi v spoju stebra-prečka še dodatna strižna obremenitev, ki je enaka  $M_b / L_b$ , kjer je  $L_b$  dolžina prečke.

V primeru, ko poteka srednjica diagonale skozi začetno točko prečke (glej poglavje 7.2), moramo pri dimenzioniranju stebra upoštevati moment  $M_c$ . Slednjega dobimo, kot je opisano v postopku zgoraj.

Vendar se vertikalna komponenta obremenitve prenese v prečko kot dodatna strižna obremenitev. Zato moramo posebno pozornost posvetiti kontroli na strig pri nosilcu. Vendar so take rešitve primerne za manjše obremenitve. Za večje obremenitve raje uporabimo vezne pločevine, ki so pričvrščene na dveh robovih.

Vozliščno pločevino v nategu preverimo upoštevajoč raznos obtežbe pod kotom  $30^\circ$ , kot je prikazano na sliki. Projektno nosilnost neto prereza vozliščne pločevine določimo s pomočjo natezne trdnosti materiala  $f_u$ .



Slika 37: Raznos obtežbe v nategu (Vir: BSCA, SCI in TATA steel, 2011, 249)

V primeru nominalno členkastega spoja steber-prečka, v katerega priključujemo diagonalni element, moramo tako obnašanje spoja v konstrukciji tudi zagotoviti. Če je vozliščna pločevina tanka in kratka, se bo spoj steber-prečka še vedno obnašal kot členek. Če pa moramo preko vozliščne pločevine vnesti v konstrukcijo večjo silo, kar zahteva debelejšo in daljšo vozliščno pločevino, je pa smotrno preveriti nosilnost in togost spoja. Mogoče se na tak način poveča upogibna nosilnost in togost spoja, tako da moramo upoštevati drugačen model.

## 5 MODELIRANJE BIM

V naslednjem poglavju bomo predstavili BIM modeliranje, ki je delno povzeto po [7] in [3]. Gradbeni projekti so zelo kompleksni, vsebujejo ogromno informacij in zahtevajo zelo veliko dela. Zato ni možno, da projekt izpelje ena oseba; ravno nasprotno – pri gradbenih projektih je potrebno veliko število strokovnjakov, ki prihajajo iz različnih področij: arhitektura, gradbene konstrukcije, energetska učinkovitost, strojništvo, elektrotehnika itd. V takih primerih je ključnega pomena kakovostna komunikacija. V preteklosti je komunikacija med udeleženci v projektu potekala preko načrtov, ki so bili izrisani ročno. Nato so ročno risanje nadomestila 2D in 3D računalniška orodja, s katerimi je bila podana le geometrija. Sedaj pa je vse bolj razširjen način projektiranja z informacijskim modelom, *angl.* Building Information Model (BIM). Model objekta BIM lahko vsebuje informacije celotnega življenjskega cikla objekta, ki jih potrebujejo udeleženci v projektu. Na tak način lahko delajo vsi udeleženci v projektu na istem modelu, komunikacija med njimi je hitrejša in informacije se ne izgubljajo.

### 5.1 Klasični način projektiranja

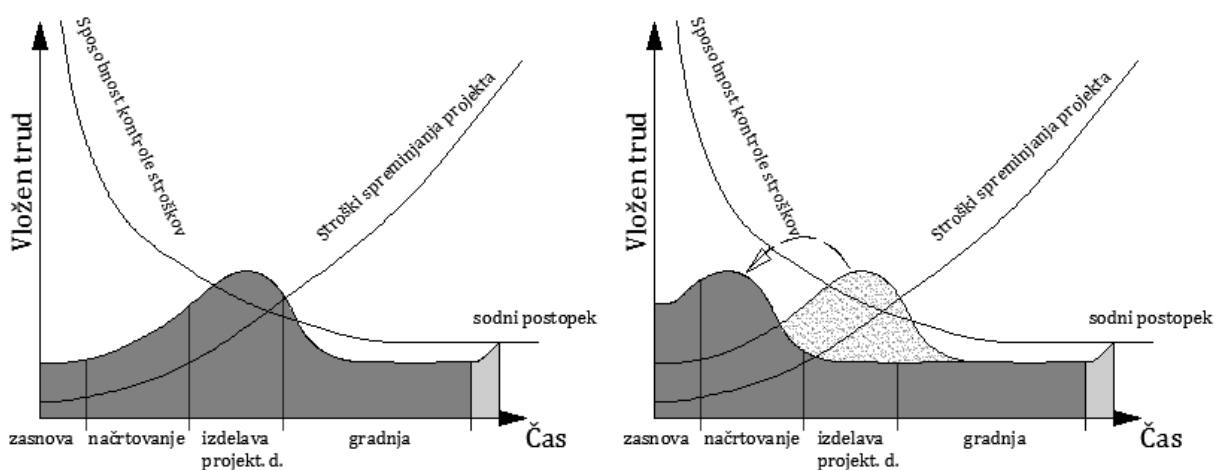
Klasični način projektiranja objekta poteka tako, da arhitekt naredi zasnovo objekta in arhitekturne podloge posreduje gradbenemu inženirju. Slednji naredi matematični model konstrukcije, določi notranje sile po elementih, dimenzionira elemente in stike med njimi ter izriše delavniške, armaturne in opazne načrte ter napiše tehnična poročila. Kasneje se sprojektira ustrezni stavbni ovoj, strojne in elektro inštalacije in drugi sistemi stavbe. Vsak izmed udeleženih posameznikov mora prejeti dokumentacijo od predhodnikov, sprojektirati in opraviti svojo nalogo in izdelati svojo projektno dokumentacijo. Pri takem načinu projektiranja opazimo, da je pri vsaki izmenjavi informacij potrebno dokumentacijo natisniti na papir; če izmenjava v digitalni obliki ni omogočena. V vsakem koraku je potrebno veliko časa in truda za nekreativna dela, kot je izdelava novega modela in tehnične dokumentacije.

Pri posredovanju informacij se lahko tudi zgodi, da se udeleženci napačno razumejo ali se del informacij celo izgubi. V primeru klasičnega posredovanja informacij tudi dlje časa traja, da se naslednji udeleženec v projektu seznani s problemom. Kadar projektne skupine opravijo načrtovanje in pripravijo projektno dokumentacijo, se načrti združijo in opazijo se morebitna neskladja. Največja neskladja, ki nastanejo kot posledica neusklajene dokumentacije, so med arhitekturo, HVAC (ogrevalni, ventilacijski in ohlajevalni sistemi) in MEP sistemi (vodovodni sistemi, elektroinštalacije in kanalizacijski sistemi). Predvsem HVAC sistemi zahtevajo kar veliko prostora, zato zaradi njih pogosto prihaja do večjih intervencij na nosilni konstrukciji.



Posebna težava so spremembe zaradi želje naročnika ali kasneje odkritih pogojev gradnje. V tem primeru je potrebno spremeniti celotno dokumentacijo za nazaj. Ker je to zelo zamuden proces, ki terja veliko energije, se spremembe na projektni dokumentaciji izvedejo nedosledno ali se celo spregledajo.

Tako se pri klasičnem načinu projektiranja napake odkrijejo pozno. Nekatere se lahko odkrijejo še pozneje v času gradnje, kar privede do zelo dragega popravljanja napak, zamud in podražitve projektov. Na Slika 38 je prikazana MacLeamyjeva krivulja. Prikazuje vloženi trud v odvisnosti od faze gradnje. Zraven sta še vrisani krivulji, ki prikazujeta zmožnost nadzorovanja stroškov in potek stroškov pri spreminjanju projekta v času gradnje. Levi graf predstavlja situacijo za klasični način projektiranja, medtem ko je na desnem predstavljen sodobni način. Opazimo, da se z uporabo sodobnih informacijskih modelov lahko vложи več truda v zgodnejših fazah projekta, kar poviša kvaliteto projekta in zmanjša njegovo ceno.



Slika 38: MacLeamyjeva krivulja (Vir: [3], 10)

## 5.2 Modeliranje BIM

Sodobni načini projektiranja z uporabo BIM modeliranja so drugačni. Tukaj lahko gradbeni inženir uporabi nosilno konstrukcijo iz arhitekturnega 3D modela in jo preko programskega vmesnika izvede v programsko okolje za izvajanje statične in dinamične analize. Konstrukcijo vnese nazaj v BIM modelirnik in enostavno spremeni, kar ni ustrezalo pogojem nosilnosti, stabilnosti in trajnosti. Tudi izdelava projektne dokumentacije vzame bistveno manj časa, saj modelirnik avtomatično zgenerira vse načrte, ki jih potrebujemo.

Glavne prednosti BIM modeliranja so prihranek časa za »neproduktivna« dela, zmanjšanje možnosti napak in enostavno odpravljanje neskladij v fazi projektiranja. BIM konsolidira vso projektno

dokumentacijo. Tako lahko vsi soudeleženi strokovnjaki združijo podmodele in preverijo morebitna neskladja.

Večina projektnih skupin dela na istem modelu. Tako so vsem skupinam v vseh fazah projekta dostopne informacije na centraliziranem modelu v čim večjem obsegu. Šele z dostopnostjo dobijo razpoložljive informacije pravi pomen. Na tak način, ko imamo vse informacije celotnega življenjskega cikla objekta zbrane na enem mestu, lahko natančneje predvidimo celotno investicijo. Projekti so dosti bolj transparentni, saj računalniška orodja za BIM modeliranje omogočajo tudi upoštevanje časovnice in stroškov.

Ker je na tak način do potankosti predvidena vsaka faza gradnje, uporabe in razgradnje objekta, se poveča produktivnost in zmanjša količina odpadkov. Slednje pomeni velik prispevek k trajnostnemu razvoju gradbeništva.

Z BIM tehnologijo ustvarimo zelo natančen virtualni model. Informacije ne služijo samo kot podpora projektiranju, gradnji, montaži, ampak tudi proizvodnji predpripravljenih izdelkov in dobavi produktov, ki jih potrebujemo za gradnjo. Na tak način se izboljša tudi komunikacija med inženirji in proizvajalci oz. dobavitelji gradbenih produktov. BIM modelirniki imajo namreč knjižnice, v katere lahko vstavimo modele poljubnih gradbenih proizvodov kot objekt. V smislu proizvodnje predpripravljenih gradbenih izdelkov so BIM orodja kot nalašč za razširitev njihove uporabnosti, če jih umestimo v knjižnico komponent.

Velika prednost BIM modelov je boljša predstava objekta preko raznih pogledov, ki nam jih omogočajo orodja. Poznamo projekcijske in modelne poglede. Projekcijski pogledi so klasični pogledi, ki jih poznamo, ts. tlorisi, narisi, prerezi in projekcije 3D modela. Modelni pogledi pa nam omogočajo le pogled izbranih elementov, npr. nosilna konstrukcija. Za izbrane elemente v modelnem pogledu lahko izberemo poljubni projekcijski pogled. Modelni pogledi so zelo priročni pri obravnavi točno izbranega sklopa elementov in detajlov.

Pri BIM modeliranju je težava njegova premajhna razširjenost in nepoznavanje, saj uvajanje zahteva precej energije, izobraževanja in denarnega vložka. Poleg tega tudi rezultati niso vidni takoj. Vendar bodo podjetja in strokovnjaki, ki imajo vizijo in hočejo povečati konkurenčnost svoje storitve oz. produkta, prepoznali koristi takšnega načina modeliranja. Danes v razvitem okolju govoriti o BIM modeliranju ne pomeni več govoriti o alternativni klasičnemu projektiranju, ampak je tak način modeliranja splošna praksa oz. zahteva s strani naročnika.

BIMa ne smemo razumeti samo kot model, ampak kot proces. Za trenutno vmesno fazo, ko BIM orodij ne uporabljajo vsi udeleženci v gradbenem projektu, so programerska podjetja razvila pregledovalnike BIM modelov, ki so prosto dostopni na spletu. Na tak način je omogočena vsaj delna

komunikacija med udeleženi v projektu. Eno takih orodij je Tekla BIMSIGHT. Poleg golega pregledovanja modelov to orodje omogoča združevanje različnih BIM modelov v enega. Ob združitvi program avtomatsko preveri morebitne »trke«. Tako lahko nemudoma odpravimo težave. Poleg tega še omogoča enostavno sporočanje med uporabniki, delo v pisarni ali na gradbišču in lahko ga uporabimo za interaktivne predstavitve od celotne konstrukcije do posameznih detajlov.

Zasledimo, da naročniki pomembnejših projektov zahtevajo BIM način projektiranja. Pot do tega, da BIM postane standard, je še dolga. Za to je potrebna razširjena uporaba v stroki in široka paleta uporabnosti računalniških orodij, ki omogočajo tak način projektiranja. En delček te zgodbe, predvsem za povečanje uporabnosti takih orodij, so aplikacije, kot smo jih narejeli v okviru te diplomske naloge, saj omogoča projektantu jeklenih konstrukcij enostavno kontrolo jeklenih spojev. Vendar izpopolnjevanje BIM orodij ne pomaga veliko, če potencialni uporabniki ne bodo s klasičnega načina projektiranja prešli na BIM.

Idealni scenarij, ko bodo vse projektne skupine delale na istem informacijskem modelu stavbe, je še daleč. Še posebej zato, ker je potrebno vse postopke komunikacije standardizirati. Tukaj ima gradbeništvo veliko razvojno priložnost.

### **5.3 Preverba kolizij**

V smislu odpravljanja omenjenih napak in neskladij so se začeli razvijati novi pristopi odkrivanja in reševanja neskladij. Na ta način lahko odkrijemo in popravimo napake že v začetni fazi zasnove in načrtovanja, kar je hitreje, učinkoviteje in ceneje z manj energije ter stresa.

Med različnimi BIM orodji obravnavamo računalniški program Tekla Structures. Le-ta nam omogoča izdelavo 3D modela konstrukcije, posredno statično in dinamično analizo, enostavno izdelavo detajlov, izdelavo delavniških in armaturnih načrtov ter izdelavo terminskega plana izvedbe konstrukcije.

Uspešnost projekta je odvisna od kvalitete projektne dokumentacije. Če je le-ta slabo in neuskaljeno pripravljena, so možnosti za napake večje. Usklajenosti projektne dokumentacije se daje še toliko večji poudarek, saj na gradbenih projektih sodeluje veliko število strokovnjakov z različnih področij: projektiranje, gradnja, proizvodnja elementov, dobava, montaža, prodaja in javni razpisi. Ta ogromna količina informacij je uporabna šele takrat, ko je enostavno in hitro dostopna vsem udeležencem v projektu. Zato je potrebno vse informacije hraniti na enem mestu in je orodje, kot je Tekla Structures, nepogrešljivo.

Na celostnem modelu z lahkoto predvidimo morebitne trke (npr. nosilna konstrukcija-inštalacije) že v fazi projektiranja. Spremembe izvedemo samo enkrat na modelu in posledično se spremenijo tudi vsi podmodeli – nenosilni elementi, inštalacije itd. Avtomatsko se spremeni tudi vsa dokumentacija.

Pristop odkrivanja neskladij v BIM informacijskem modelu se imenuje Collision detection (angl. Odkrivanje trkov). V programu Tekla Structures najdemo to orodje pod imenom Clash check.

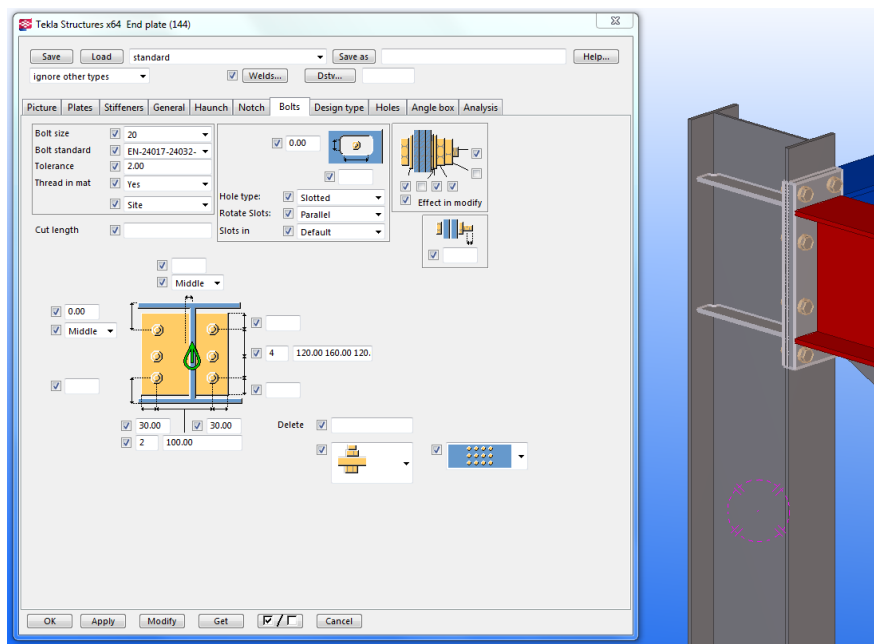
Za razliko od klasičnega načina projektiranja je način spreminjanja projekta in dokumentacije precej bolj fleksibilen. Pomembno je tudi, da se neskladja rešuje skupno, ne pa da zgolj prelagamo odgovornost na drugega udeleženca v projektu.

#### **5.4 Knjižnica parametričnih komponent**

Kadar imamo v Tekli narejen model konstrukcije do te mere, da so znani vsi elementi, moramo urediti še stikovanje med njimi. Tukaj uporabimo knjižnico parametričnih komponent. V tej knjižnici najdemo jeklene spoje, možnosti armiranja in ostale detajle. V nadaljevanju smo se osredotočili na komponente za jeklene spoje. Na tak način je proces izdelave modela spojev precej avtomatiziran. Naknadnim spremembam elementov se spoj samodejno prilagaja.

Delo s spoji je enostavno. Najprej v knjižnici izberemo vrsto spoja oz. komponente, ki jo hočemo vstaviti v model. Izberemo primarni element in sekundarnega oz. vse sekundarne, ki jih v spoj priključujemo, in spoj je ustvarjen. Z ukazom »AutoDefaults« program sam ustvari model spoja, ki je prilagojen dejanskemu stanju. Nato lahko sami spreminjamo parametre, kot so število vijakov, velikost vijakov, debelina pločevin, izbira materiala itd.

Nad spojem se izriše stožec, ki predstavlja del, kjer je bila uporabljena komponenta za spoje. Če je spoj zelen, pomeni, da je s spojem vse v redu. Če je rumene barve, pomeni da so v spoju prisotne napake. Rdeč stožec pomeni neuspešno izveden spoj. V programu lahko tudi spreminjamo pogled – ali je spoj viden, ali je delno obarvan, črno obarvan ipd. Na voljo imamo tudi detajlni pogled spoja, ko nam program sam zgenerira tipične poglede spoja.

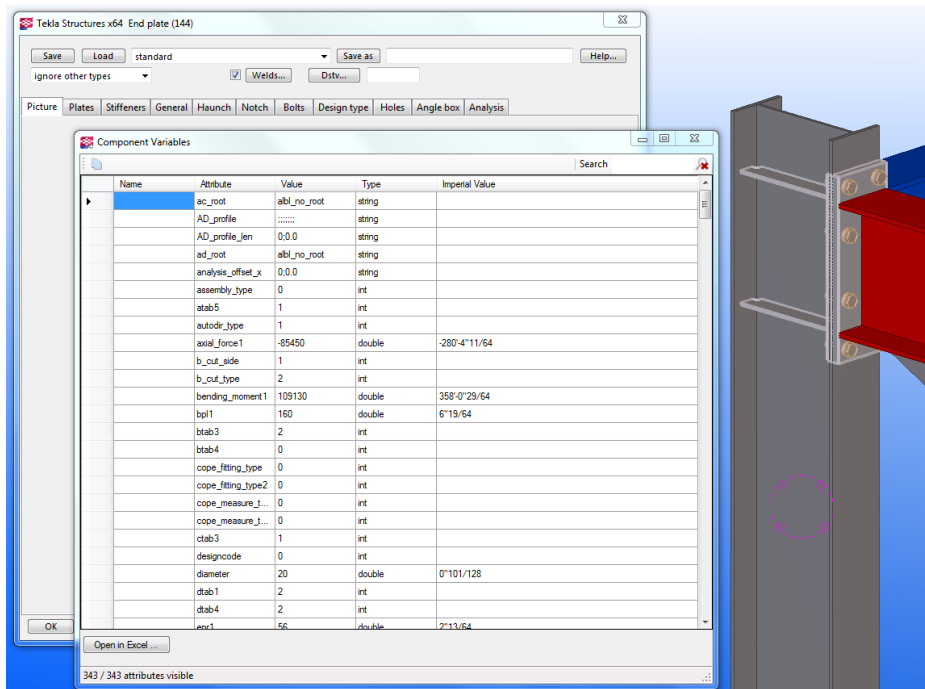


Slika 39: Prikaz momentnega spoja s čelno pločevino. Prikazano je tudi pogovorno okno, kjer spreminjamo parametre spoja

Da je program Tekla Structures prvenstveno namenjen jeklenim konstrukcijam, nam priča bogata knjižnica jeklenih elementov. Imamo široko paleto spojev, vijakov, podložk, zvarov itd. Uporaba knjižnice parametričnih komponent nam res pospeši delo. Upoštevajoč dejstvo, da s pomočjo makrojev v Excelu avtomatiziramo še dimenzioniranje spojev, projektiranje spojev sploh ni več tako zamudno.

### 5.5 Izvoz spremenljivk v Excel

Iz Tekle lahko s pomočjo orodja `ComponentVariableImporter` izvozimo parametre iz programa Tekla v Excel. Uporaba je povsem preprosta. Na računalnik moramo namestiti in zagnati file `MSI Installer`. V programu Tekla pod zavihkom `Tools` najdemo možnost `Macros`. Tam poiščemo `ComponentVariableImporter`. Orodje zaženemo in izberemo spoj, katerega obravnavamo. Samodejno se v orodje izpišejo vsi parametri spoja v obliki preglednice. Nato lahko z enostavnim kopiranjem preglednico prenesemo v Excel, kjer podatke obdelujemo naprej. Tudi morebitne spremembe, ki jih naknadno storimo na spoju, se s klikom na gumb `Modify` samodejno spremenijo tudi v orodju za spremenljivke.



Slika 40: Prikaz uporabe orodja ComponentVariableImporter

## 6 DATOTEKE EXCEL Z MAKROJI ZA DIMENZIONIRANJE SPOJEV

V okviru diplomske naloge smo pripravili Excelove datoteke z makroji za kontrolo priključkov diagonale na vozliščno pločevino, členkast spoj z vezno pločevino (prečka-prečka, steber-prečka) in momentni spoj s čelno pločevino (steber-prečka). V programu Tekla Structures jih najdemo kot komponente 11, 146 in 144. Kadar uporabnik vnese vhodne podatke iz Tekle v Excelovo datoteko, lahko požene makro, ki dimenzionira spoj.

Makro je manjši računalniški program, s katerim avtomatiziramo ponavljajoče se naloge. V programu zapišemo dogodke, ki se morajo zgoditi, da dobimo želene rezultate. Na tak način privarčujemo pri energiji in času. Makroje v Excelu zapišemo v jeziku Excel VBA (Visual Basic for Applications). To je verzija programskega jezika Visual Basic, ki je bila razvita predvsem za programiranje enostavnih pisarniških programov.

### 6.1 Excelove datoteke

Excelove datoteke so zasnovane tako, da imajo pet glavnih zavihkov. Prvi je poimenovan InputTekla. Tam uporabnik vnese tabelo s podatki o spoju iz Tekle. Naslednji zavihek je VhodniPodatki. Tukaj se nahajajo vsi vhodni podatki, ki jih potrebujemo za izračun. Od tod jih makro tudi prebere. Najpogosteje uporabljena funkcija v tem zavihku je funkcija VLOOKUP. To funkcijo sem uporabil, da sem poiskal določeno spremenljivko v zavihku InputTekla in prebral pripadajočo vrednost. Črka V pomeni, da funkcija išče v prvem stolpcu navedene tabele. Lahko bi jo zamenjali s črko H, kjer bi pomenilo, da iščemo po prvi vrstici matrike. Sintaksa za obravnavano funkcijo:

```
VLOOKUP(iskana_vrednost;matrika_tabele;št_indeksa_stolpca;[obseg_isk  
anja])
```

Argument `iskana_vrednost` je obvezen in predstavlja vrednost, ki jo želimo najti. Argument `matrika_tabele` je prav tako obvezen. Tukaj podamo matriko tabele kot sklic na obseg ali kot njegovo ime. Nato s `št_indeksa_stolpca` podamo, v katerem stolpcu naj funkcija poišče želeno vrednost. Če podamo število 1, nam funkcija vrne vrednost iz prvega stolpca matrike, če podamo 2, iz drugega itd. Priporočljivo je podati tudi argument `obseg_iskanja`, ki sicer ni obvezen. Če podamo vrednost `FALSE`, funkcija poišče le rezultate z natančnim ujemanjem. V zavihku VhodniPodatki so grafično prikazana mesta, kjer lahko vrednosti spremenljivk spreminjamo v pogovornih oknih programa Tekla Structures. Določene vrednosti poiščemo še v zavihkih Podatki in Profili oz. Kotniki.

V zavihku Dimenzioniranje se nahaja gumb, ki sproži makro. Sem se vpišejo rezultati, ki jih dobimo ob kontroli spoja z makrojem. Poleg rezultatov izračuna so navedeni še pripadajoči vhodni podatki, da

uporabnik lahko primerja spremenjene količine, preden spremeni model spoja v BIM modelu. Poleg tega makro vpiše še vmesne rezultate kontrol, ki jih izvaja.

V zavihku Profili najdemo podatke profilov IPE, H in U. Uporabili smo Excelovo preglednico, ki jo dobimo na povezavi [10].

## 6.2 Makro zapisan v VBA

Makro sprožimo s klikom na gumb Dimenzioniraj spoj. V kodi sprva deklariramo globalne spremenljivke. To storimo z ukazom Public ... As ... Spremenljivke lahko deklariramo kot Integer, Single, Double in String. Kot Integer shranimo cela števila, kot Single racionalna, kot Double racionalna z večjo natančnostjo in tekst shranimo kot String.

Kadar uporabnik klikne gumb Dimenzioniraj spoj, se začnejo izvajati akcije, ki predstavljajo posamezne kontrole, npr. kontrola bruto prereza profila, kontrola bočnih pritiskov itd. Vsako kontrolo pokličemo z ukazom Call. Sprva pokličemo akcijo Vhodni podatki, kjer je tipična vrstica:

```
b = Worksheets("VhodniPodatki").Range("C36").Value,
```

kjer b predstavlja ime spremenljivke za širino pasnice profila. Z ukazom Worksheets("VhodniPodatki") povemo programu, naj gre v zavihek VhodniPodatki, z Range("C36") izberemo celico C36, od koder preberemo vrednost. Poleg vseh spremenljivk, ki jih preberemo iz zavihka VhodniPodatki, pokličemo še pogovorno okno, kjer uporabnik izbere profil priključenega elementa v spoju ali določi kako drugo količino.

Kontrole se izvajajo ena za drugo. V makroju smo uporabili različne funkcije in pogojne konstrukte ali zanke, s katerimi spreminjamo potek izvajanja programa.

Navajamo pogosto uporabljene funkcije:

- `InStr([start], string, substring, [compare])`

Argument [start] ni obvezen, določa pa začetno točko iskanja. Če tega ne podamo, program začne primerjati na začetku spremenljivke. Z argumentom string podamo spremenljivko, znotraj katere iščemo argument substring. Argument [compare] tudi ni obvezen. Z njim podamo vrsto primerjave – ali gre za binarno ali tekstualno.

- `WorksheetFunction.Max(...)` oz. `Min(...)`

S to funkcijo podamo največjo oz. najmanjšo vrednost v nizu podatkov, ki jih podamo znotraj oklepajev.



- Int(expression)

Ta funkcija povrne celoštevilčni del izraza v oklepaju.

V Preglednici 3 so navedene najpogosteje uporabljene zanke.

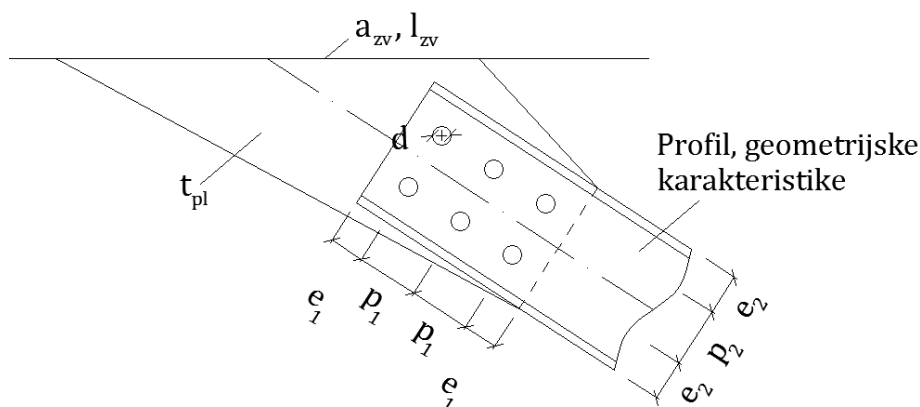
Preglednica 3: Seznam zank v VBA

	Psevdokoda	VBA
Pogojno izvajanje	Če je <izjava> potem naredi A Do sem	If <izjava> Then A End If
Pogojno izvajanje niza operacij	Če je <izjava1> potem naredi A Če <izjava2> naredi B Sicer naredi C Do sem	If <izjava1> Then A Elseif <izjava2> B Else C End If
Ponavljanje niza operacij (do-while)	Ponavljaj naredi A Dokler je <izjava>	Do A Loop While <izjava>
Ponavljanje niza operacij (while)	Dokler je <izjava> ponavljaj naredi A Do sem	Do While <izjava> A Loop
Ponavljanje niza operacij s pomočjo števca	Za i=1 do N ponavljaj naredi A Do sem	For i=1 to N A Next i

Pogosto smo uporabili kombinacijo zank pogojnega izvajanja in ponavljanja niza operacij.

### 6.3 Makro za dimenzioniranje komponente 11 in prikaz sheme le-tega

V knjižnici komponent v programu Tekla Structures predstavlja Komponenta 11 priključek nateznega elementa preko vezne pločevine. S klikom na gumb Dimenzioniraj spoj se pričnejo izvajati posamezne kontrole. Če se kontrole ne izidejo, makro spremeni vrednost spremenljivk, ki so predstavljene na Slika 41.



Slika 41: Spremenljivke v Komponenti 11

V makroju sprva izvedemo **kontrola bruto prereza profila**. Če se kontrola ne izide, izberemo večji prerez. Nato preverimo **strižno nosilnost vijakov**. Iz te kontrole določimo potrebno število vijakov, jih razporedimo in preverimo, da spoj ni predolg. Če je spoj predolg, povečamo premer vijakov in ponovimo celotno kontrolo strižne nosilnosti vijakov. Ne reduciramo nosilnosti skupine vijakov s parametrom  $\beta_{lf}$ , saj na tak način ostanejo vijaki najbolj izkoriščeni. Nato preverimo **ustreznost robnih razdalj in razdalj med vijaki**  $e_1$ ,  $p_1$  in  $p_2$ . Če dimenzije ne ustrezajo pogojem, jih povečamo oz. zmanjšamo. Pri tem pazimo, da spoj ni predolg. Določimo še dimenzijo  $e_2$ , ki je prečno na smer delovanja obtežbe. Pri kontroli razporeditve vijakov nastopa parameter  $t$ , ki ga določimo kot  $t = \min(t_w, t_{pl})$ , kjer je  $t_w$  debelina stojine profila,  $t_{pl}$  pa debelina vezne pločevine. Kadar **kontroli neto prereza profila in bočnih pritiskov** nista izpolnjeni, povečujemo prerez in debelino vozliščne pločevine. Pri **kontroli strižnega iztrga** povečujemo dimenziji  $e_1$  in  $p_1$ , vendar pri tem upoštevamo, da spoj ni predolg. Če se kontrola **neto prereza vozliščne pločevine** ne izide, povečamo debelino pločevine  $t_{pl}$ . Nazadje preverimo še **nosilnost zvarov** med vezno pločevino in pasnico prečke oz. stebra. Če se kontrola ne izide, povečujemo debelino zvarov  $a_{zv}$ , dokler ne dosežemo zgornje omejitve za  $a_{zv}$ . Če kontroli še vedno ni zadoščeno, povečamo dolžino zvara.



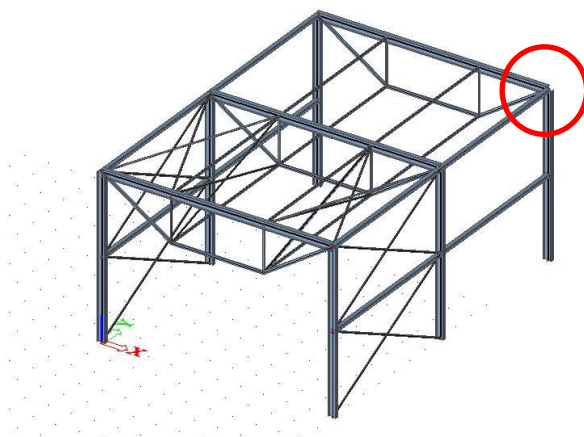
Slika 42: Shema makroja za dimenzioniranje komponente 11

## 7 PRIMERI UPORABE MAKROJEV

Delovanje makrojev bomo prikazali na primerih spojev izbrane konstrukcije. V prečni smeri je nosilni sistem konstrukcije enoetažni pomični okvir, v vzdolžni nepomični okvir s centralnim povezjem. Iz analize konstrukcije so nas zanimale predvsem obremenitve v spojih, ki smo jih kasneje uporabili pri dimenzioniranju spojev s pomočjo makrojev. Osrednji del naslednjega poglavja je prikaz celotnega računa dimenzioniranja spojev, ki ga makro izvede avtomatsko.

### 7.1 Statična analiza konstrukcije

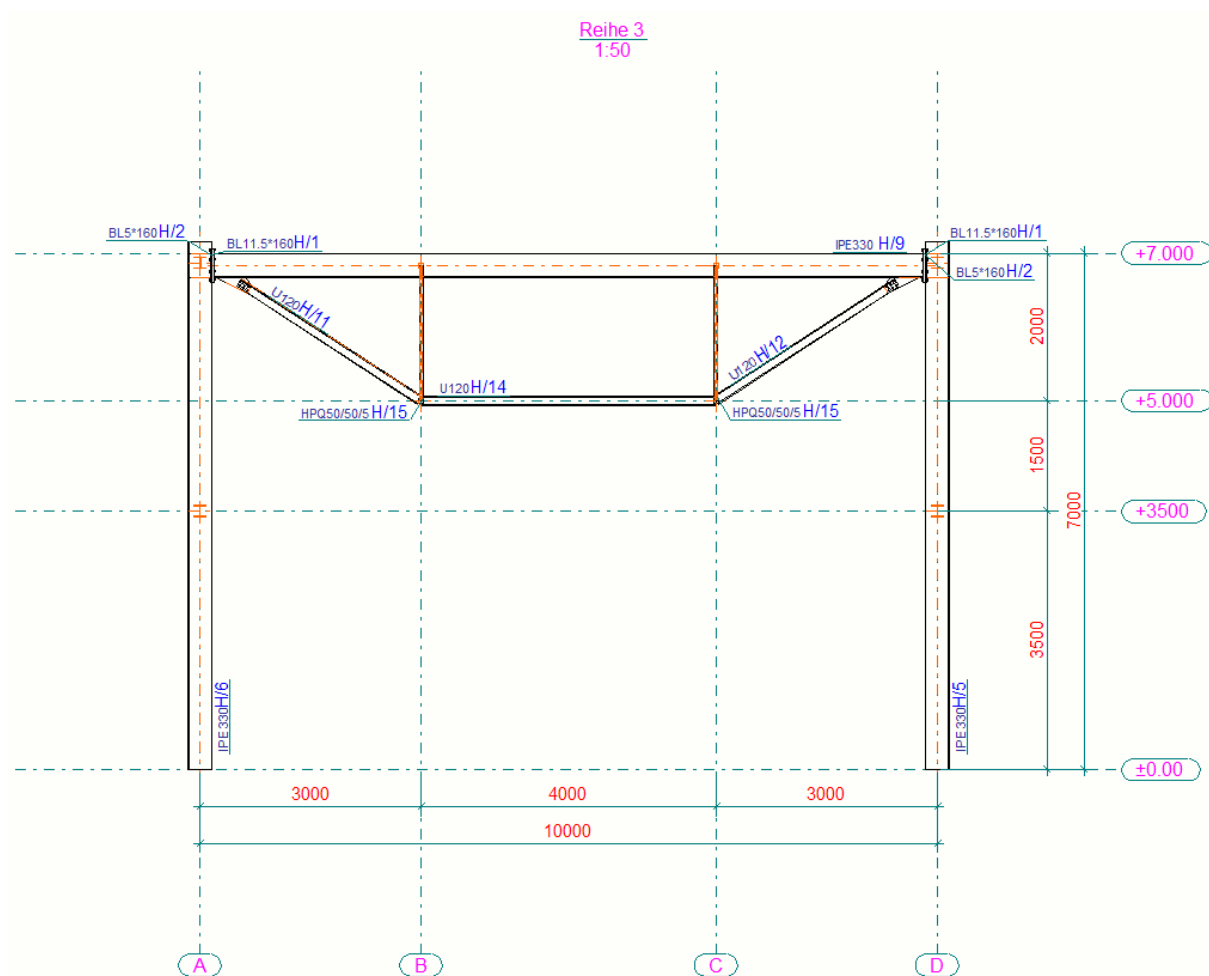
Statično analizo konstrukcije smo opravili v programu Scia Engineer. Model konstrukcije prikazujemo na Slika 43. Tlorisne dimenzije objekta znašajo 10x14 metrov. Razdalja med glavnimi okvirji v vzdolžni smeri je sedem metrov. Dimenzije objekta po višini so podane na Slika 46.



Slika 43: Model konstrukcije v programu Scia Engineer z označeno lokacijo spojev

Okvir sestavljajo stebri in prečke prereza IPE 330. Za zmanjšanje upogibne obremenitve v glavnih prečkah smo dodali natezni pas iz profilov U120. Centrična povezja, ki zagotavljajo togost v vzdolžni smeri, pa sestavljajo kotniki L70x70x7. Vzdolžne prečke pa so iz profilov HEB 160.

V vertikalni smeri delujeta na konstrukcijo obtežbi snega  $q_s = 1,4kN/m^2$  in stalna obtežba  $g_{st} = 1,0kN/m^2$ . V horizontalni smeri deluje veter  $q_v = 0,7kN/m^2$ . Le tega smo upoštevali v vzdolžni  $q_{v,y}$ , kot tudi v prečni smeri  $q_{v,x}$ . Seveda je prisotna tudi lastna teža  $g$ , vendar le-to program upošteva samodejno. Iz obtežb smo sestavili kombinacije, ki jih prikazujemo v Preglednica 4. Pri tem smo upoštevali kombinacijski faktor za sneg  $\psi_0 = 0,5$  in faktor za veter  $\psi_0 = 0,6$ .



Slika 44: Prečni prerez v osi 3

Preglednica 4: Kombinacije obtežb

Ime kombinacije	Vsebina kombinacije
K1	$1,00 \cdot (g + g_{st}) + 1,5 \cdot q_{v,x}$
K2	$1,00 \cdot (g + g_{st}) + 1,5 \cdot q_{v,y}$
K3	$1,35 \cdot (g + g_{st}) + 1,5 \cdot q_s$
K4	$1,00 \cdot (g + g_{st}) + 1,5 \cdot q_{v,x} + 1,5 \cdot 0,5 \cdot q_s$
K5	$1,00 \cdot (g + g_{st}) + 1,5 \cdot q_{v,y} + 1,5 \cdot 0,5 \cdot q_s$
K6	$1,35 \cdot (g + g_{st}) + 1,5 \cdot q_s + 1,5 \cdot 0,6 \cdot q_{v,x}$
K7	$1,35 \cdot (g + g_{st}) + 1,5 \cdot q_s + 1,5 \cdot 0,6 \cdot q_{v,y}$

Naredili smo nelinearno elastično analizo. Najbolj kritična kombinacija za okvir je kombinacija K4. Predvsem so nas zanimala obremenitve v spojih, ki se nahajajo na označeni lokaciji, kot je prikazano na Slika 43. Tisto lokacijo smo si izbrali, saj se tam nahajajo le spoji, ki smo jih lahko dimenzionirali z našimi makroji; ni dodatnih priključkov povezij.

Obremenitve, na katere smo dimenzionirali spoje, smo prebrali iz najbolj obremenjenega spoja iste vrste. Tako smo določili:

- Obremenitev momentnega spoja

$$M_{y,Ed} = -96,03 \text{ kNm}$$

$$V_{z,Ed} = 25,77 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = -85,45 \text{ kN}$$

- Obremenitev členkastega spoja z vezno pločevino

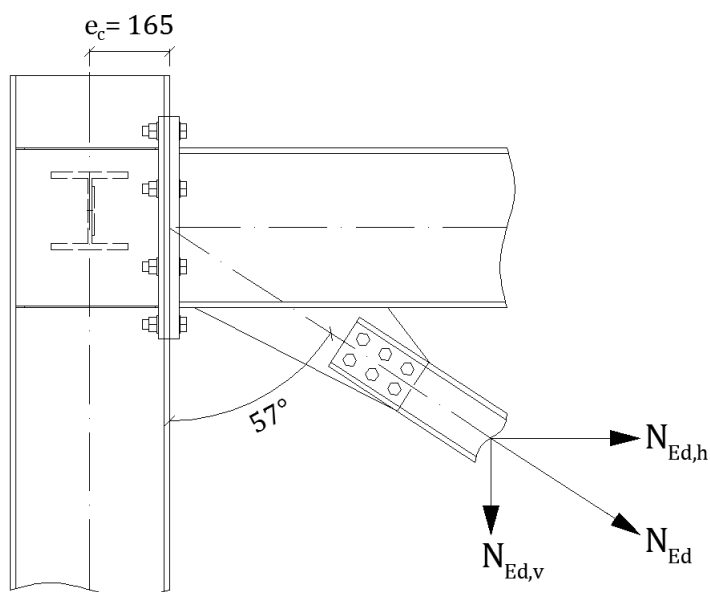
$$V_{z,Ed} = 18,79 \text{ kN}$$

- Obremenitev priključka nateznega elementa na vezno pločevino

$$N_{Ed} = 145,34 \text{ kN}$$

## 7.2 Upoštevanje dodatnih vplivov postavitve in oblikovanja spojev

Natezni element je priključen na prečko, tako da se srednjici elementov stikata v začetni točki prečke (glej Slika 45). Tak način priključevanja nateznih elementov je priporočljiv za lažje obremenitve. Pri večjih obremenitvah je bolje izbrati vezno pločevino, ki je podprta na dveh robovih, tj. na stebru in na prečki. Če zagotovimo stikovanje vezne pločevine neposredno na steber kot tudi na prečko, del obtežbe prevzame steber, del pa prečka (glej poglavje 4.1.3). Če je sila v diagonalnem elementu natezna, povzroča komponenta sile  $H_c$  v spoju tlake. V tem primeru je ugodno za spoj tudi dejstvo, da se komponenta  $V_c$  prenese direktno na steber in pomeni manjšo strižno obremenitev spoja. Ampak je takšno izvedbo vezne pločevine možno zagotoviti le pri členkasti spojih. V primeru momentih spojev se največkrat podaljša čelno pločevino momentnega spoja in na njo privari vezno pločevino diagonalnega elementa. Tako se osna sila iz diagonalnega elementa v celoti prenaša preko momentnega spoja v steber.



Slika 45: Prikaz oblikovanja in postavitve spojev ter ekscentričnosti, ki se ob tem pojavi

V našem primeru prečka ni dodatno upogibno obremenjena, vendar se pojavijo naslednje obremenitve:

- Dodatna strižna obremenitev v spoju, ki je enaka vertikalni komponenti natezne sile v diagonali. Le-to prištejemo strižni obremenitvi, katero smo dobili pri statični analizi konstrukcije. Pri kombinaciji K4 znaša natezna sila v diagonalnem elementu  $N_{Ed} = 79,8 \text{ kN}$ .

$$N_{Ed,v} = N_{Ed} \times \cos \alpha = 79,8 \text{ kN} \times \cos 57^\circ = 43,5 \text{ kN}$$

- Dodatna strižna obremenitev v prečki, ki je prav tako enaka  $N_{Ed,v}$ .

Obremenitev prištejemo maksimalni prečni sili, ki se pojavi v prečki pri kombinaciji 4. Preverimo, ali je prečna sila manjša od polovice nosilnosti na strig, saj tako ni interakcije strig-upogib:

$$V'_{Ed} = V_{Ed} + N_{Ed,v} = 25,77 \text{ kN} + 79,1 \text{ kN} = 104,9 \text{ kN}$$

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_{f2} + (t_{w2} + 2 \cdot r_2) \cdot t_{w2} = \\ = (62,6 - 2 \cdot 16,0 \cdot 0,15 + (0,75 + 2 \cdot 1,8) \cdot 0,75) \text{ cm}^2 = 29,1 \text{ cm}^2$$

$$V'_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd} = 0,5 \cdot \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 0,5 \cdot \frac{29,1 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,0 \cdot \sqrt{3}} = 197,1 \text{ kN}$$

- Dodatna upogibna obremenitev v stebru  $M_c$ , ki je enaka produktu med vertikalno komponento sile nateznega elementa  $N_{Ed,v}$  in ekscentričnosti  $e_c$ , ki je enaka polovici višine stebra  $e_c = h_1 / 2 = 330 \text{ mm} / 2 = 165 \text{ mm}$ .

$$M_c = e_c \times N_{Ed,v} = 16,5 \text{ cm} \times 79,1 \text{ kN} = 1306 \text{ kNcm} = 13,1 \text{ kNm}$$

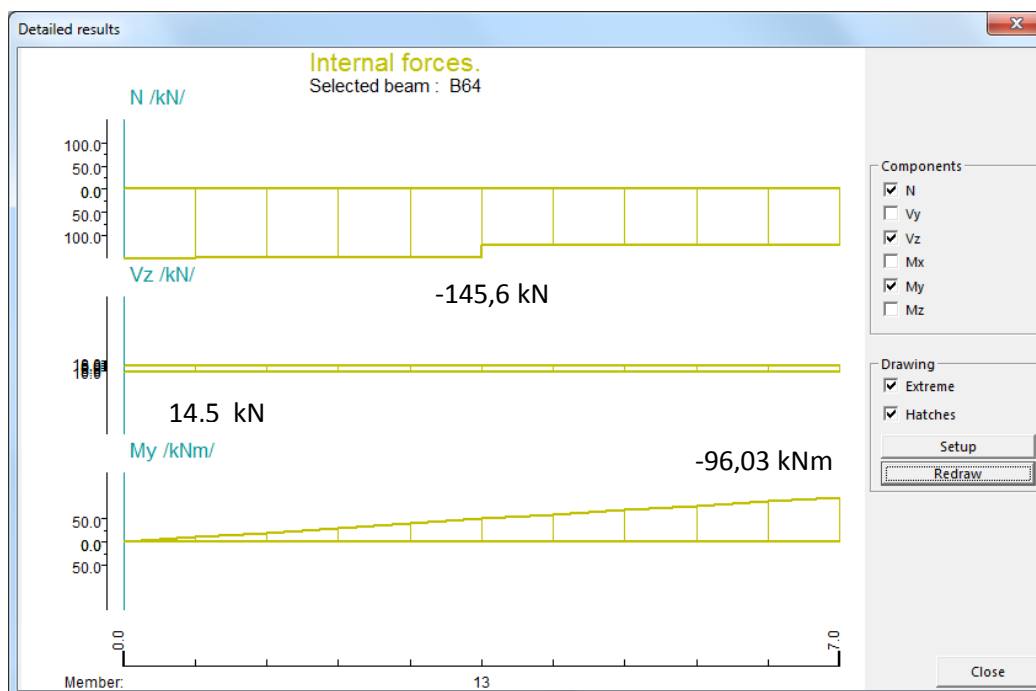
- Manjša tlačna obremenitev v spoju, saj od tlačne osne sile v spoju odštejemo horizontalno komponento sile v diagonali  $N_{Ed,h}$ . Zmanjšana obremenitev je posledica premaknjene prijemašča sile v diagonali.

$$N_{Ed,h} = N_{Ed} \times \sin \alpha = 79,8 \text{ kN} \times \sin 57^\circ = 66,9 \text{ kN}$$

$$N'_{Ed} = N_{Ed} - N_{Ed,h} = -85,45 \text{ kN} - (-66,9 \text{ kN}) = -18,6 \text{ kN}$$

### 7.2.1 Kontrola nosilnosti stebra

Ker je bil v okviru analize konstrukcije steber preverjen na manjše obremenitve, moramo naknadno preveriti nosilnost stebra. Steber prereza IPE 330 je najbolj obremenjen pri kombinaciji K4, kjer so prisotne naslednje sile (enoosni upogib okoli močne osi y-y z osno silo).



Slika 46: Izpis obremenitev najbolj obremenjenega stebra iz programa Scia Engineer



Povečamo obremenitvi.

$$M'_{Ed} = M_{Ed} + M_c = -(96,03 + 13,10) \text{ kNm} = -109,1 \text{ kNm}$$

$$V'_{Ed} = V_{Ed} + \frac{M_c}{L} = \left( 14,5 + \frac{13,1}{7,0} \right) \text{ kN} = 16,4 \text{ kN}$$

### 7.2.1.1 Kontrola kompaktnosti prereza

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1, \quad f_y \text{ v [MPa]}$$

- Stojina

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{N_{Ed}}{2 \cdot d \cdot t_w \cdot f_y} = \frac{1}{2} + \frac{145,6 \text{ kN}}{2 \cdot 27,1 \text{ cm} \cdot 0,75 \text{ cm} \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 0,652$$

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = \frac{271}{7,5} = 36,1 \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = \frac{396 \cdot 1,0}{13 \cdot 0,652 - 1} = 52,9$$

- Pasnica

$$c = \frac{1}{2} \cdot (b - t_w - 2 \cdot r) = \frac{1}{2} \cdot (160 - 7,5 - 2 \cdot 18) \text{ mm} = 58,3 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c}{t_f} = \frac{58,3 \text{ mm}}{11,5 \text{ mm}} = 5,1 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 1,0 = 9$$

Prerez spada v 1. Razred kompaktnosti.

- Stojina – strig

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{307 \text{ mm}}{7,5 \text{ mm}} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \frac{1,0}{1,2} = 60$$

Stojina je kompaktna v strigu.

### 7.2.1.2 Kontrola nosilnosti elementa

Prečni prerez v strigu

$$V'_{Ed} = 16,4kN \leq 0,5 \cdot \frac{29,1 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 98,6kN$$

$$A_v = (62,6 - 2 \cdot 16,0 \cdot 1,15 + (0,75 + 2 \cdot 1,8) \cdot 0,75) cm^2 = 29,1cm^2$$

Uklon okoli močne osi y-y

$$L_{uy} = 7,0m$$

$$i_y = 13,7cm$$

$$\lambda_l = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{uy}}{i_y \cdot \lambda_l} = \frac{700cm}{13,7cm \cdot 93,9} = 0,544$$

$$krivulja a \Rightarrow \chi_y = 0,91$$

Bočna zvrnitev – bočna podpora na sredini stebra

$$L = 350cm$$

$$k_z = 1,0, k_\omega = 1,0$$

$$C_1 = 1,31 (\psi = 1/2)$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi}{k_z \cdot L} \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t + \frac{\pi \cdot E \cdot I_z \cdot E \cdot I_\omega}{(k_\omega \cdot L)^2}}$$

$$M_{cr} = 1,31 \cdot \frac{\pi}{1,0 \cdot 350cm} \cdot \sqrt{21000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 788cm^4 \cdot 8100 \frac{kN}{cm^2} \cdot 28,1cm^4 + \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 788cm^4 \cdot 21000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 199100cm^6}{(1,0 \cdot 350cm)^2}}$$

$$M_{cr} = 35937kNcm$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{804cm^3 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}}{35937kNcm}} = 0,725 \Rightarrow \chi_{LT} = 0,84 \text{ (krivulja a)}$$

Izračun faktorja  $k_{yy}$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi = 0,6 + 0,4 \cdot 0,5 = 0,8$$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left[ 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_y \cdot A \cdot f_y} \right] = 0,8 \cdot \left[ 1 + (0,544 - 0,2) \cdot \frac{145,6kN \cdot 1,0}{0,91 \cdot 62,6cm^2 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}} \right]$$

$$k_{yy} = 0,830$$

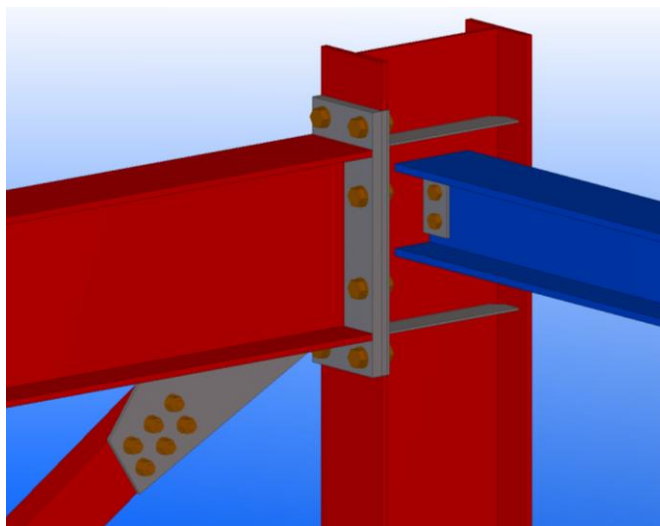
Interakcijska enačba

$$\frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_y \cdot A \cdot f_y} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot W_{y,pl} \cdot f_y} \leq 1,0$$
$$\frac{145,6kN \cdot 1,0}{0,91 \cdot 62,6cm^2 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}} + 0,830 \cdot \frac{10910kNcm \cdot 1,0}{0,84 \cdot 804cm^3 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}} \leq 1,0$$
$$0,70 \leq 1,0$$

Program Scia Engineer poda prav tako 70% izkoriščenost elementa.

### 7.3 Dimenzioniranje spojev in prikaz uporabe makrojev

Dimenzionirali smo spoje, prikazane na Slika 47. Pri dimenzioniranju smo upoštevali priporočilo, da uporabljamo vijake iste velikosti z isto kvaliteto. Tako smo v členkastem spoju in priključku nateznega elementa uporabili vijake M16 8`8 ter v momentnem spoju M20 10`9.



Slika 47: Prikaz obravnavanih spojev – momentni (steber-prečka), členkast z vezno pločevino (steber-modra prečka) in priključek nateznega elementa.

#### 7.3.1 Momentni spoj

Uporabili smo jeklo S235, osem vijakov M20 10`9, prerez stebra in prečke IPE330. Upoštevaajoč ekscentričnost priključka nateznega elementa je obremenitev v spoju sledeča:

$$M'_{Ed} = 109,1kNm$$

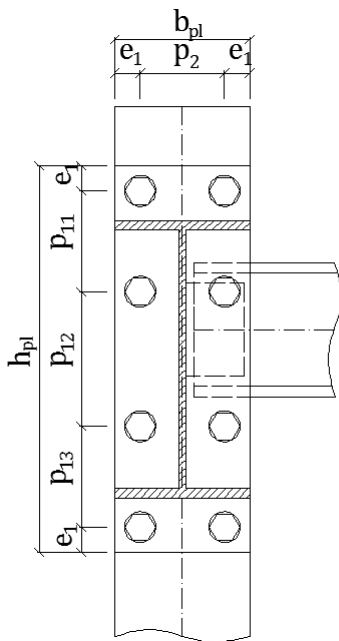
$$V'_{Ed} = V_{Ed} + N_{Ed,v} = (25,77 + 43,5)kNm = 69,2kNm$$

$$N'_{Ed} = -18,6kN$$

Pri geometrijskih karakteristikah prereza sta uporabljena indeks 1, ki predstavlja prerez stebra in indeks 2, s katerim označujemo lastnosti prereza prečke. Osno-upogibno obtežbo premaknemo v prijemališče rezultante tlačnih sil, ki se nahaja v sredini tlačene pasnice prečke.

$$M_{Eds} = M'_{Eds} + N'_{Ed} \cdot \frac{h_2 - t_{f2}}{2} = 109,1 \text{ kNm} - 18,6 \text{ kN} \cdot \frac{0,330 - 0,0115}{2} \text{ m}$$

$$M_{Eds} = 106,1 \text{ kNm}$$



Slika 48: Prikaz razdalj med vijaki

Razporeditev vijakov – robne razdalje in razdalje med vijaki

$$d_0 = d + 2 \text{ mm} = (20 + 2) \text{ mm} = 22 \text{ mm}$$

$$t = \min(t_{f1}, t_{pl}) = \min(11,5, 20) \text{ mm} = 11,5 \text{ mm}$$

$$2,2 \cdot d_0 = 2,2 \cdot 22 \text{ mm} \leq p_{11} = p_{13} \leq \min(14 \cdot t, 200) = \min(14 \cdot 11,5 \text{ mm}, 200)$$

$$48,4 \text{ mm} \leq p_{11} = p_{13} = 120 \text{ mm} \leq 161 \text{ mm}$$

$$2,2 \cdot d_0 = 2,2 \cdot 22 \text{ mm} \leq p_{12} \leq \min(14 \cdot t, 200) = \min(14 \cdot 11,5 \text{ mm}, 200)$$

$$48,4 \text{ mm} \leq p_{12} = 160 \text{ mm} \leq 161 \text{ mm}$$

$$e_1 = \frac{h_{pl} - (p_{11} + p_{12} + p_{13})}{2} = \frac{460 - (120 + 160 + 120)}{2} \text{ mm} = 30 \text{ mm}$$

$$1,2 \cdot d_0 = 1,2 \cdot 22 \text{ mm} \leq e_1 \leq \max(8 \cdot t, 125) = \min(8 \cdot 11,5 \text{ mm}, 125)$$

$$26,4 \text{ mm} \leq e_1 = 30 \text{ mm} \leq 125 \text{ mm}$$

$$2,4 \cdot d_0 = 2,4 \cdot 22\text{mm} \leq p_2 \leq \min(14 \cdot t, 200) = \min(14 \cdot 11,5\text{mm}, 200)$$

$$52,8\text{mm} \leq p_2 = 100\text{mm} \leq 161\text{mm}$$

$$e_2 = \frac{b_{pl} - p_2}{2} = \frac{160 - 100}{2} \text{mm} = 30\text{mm}$$

$$1,2 \cdot d_0 = 1,2 \cdot 22\text{mm} \leq e_2 \leq \max(8 \cdot t, 125) = \min(8 \cdot 11,5\text{mm}, 125)$$

$$26,4\text{mm} \leq e_2 = 30\text{mm} \leq 125\text{mm}$$

Razporeditev obtežbe med vijaki (definicija razdalj na Slika 49)

$$r_1 = \frac{h_2 - p_{12} - t_{f2}}{2} = \frac{330 - 160 - 11,5}{2} \text{mm} = 79,25\text{mm}$$

$$r_2 = \frac{h_2 + p_{12} - t_{f2}}{2} = \frac{330 + 160 - 11,5}{2} \text{mm} = 239,25\text{mm}$$

$$r_{\max} = r_2 + p_{11} = (239,25 + 120) \text{mm} = 359,25\text{mm}$$

$$F_{\max} = r_{\max} \cdot \frac{M_{Eds}}{r_1^2 + r_2^2 + r_{\max}^2} = \left( 35,93 \cdot \frac{10610}{7,93^2 + 23,93^2 + 35,93^2} \right) \text{kN}$$

$$F_{\max} = 197,9\text{kN}$$

$$F_m = F_{\max} \cdot \left( \frac{r_1 + r_2}{r_{\max}} + 1 \right) = 197,9\text{kN} \cdot \left( \frac{7,93 + 23,93}{35,93} + 1 \right)$$

$$F_m = 373,4\text{kN}$$

Kontrola strig-upogib

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

$$F_{v,Rd} = 98\text{kN}$$

$$F_{v,Ed} = \frac{V'_{Ed}}{m} = \frac{69,2\text{kN}}{8} = 8,65\text{kN}$$

$$F_{t,Rd} = 176,4\text{kN}$$

$$F_{t,Ed} = \frac{F_{\max}}{2} = \frac{197,9\text{kN}}{2} = 98,9\text{kN}$$

$$\frac{8,65}{98} + \frac{98,9}{1,4 \cdot 176,4} = 0,49 \leq 1,0$$

Kontrola preboja pločevine

$$F_{t,Ed} = \frac{F_{\max}}{2} \leq B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$\frac{197,9kN}{2} = 98,9kN \leq \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 3,106cm^2 \cdot 1,15cm \cdot 36 \frac{kN}{cm^2}}{1,25} = 193,9kN$$

Kontrola pasnice stebra

$$t_{f1} \geq 0,5 \cdot t_{pl}$$

$$11,5mm \geq 0,5 \cdot 20mm = 10mm$$

$$t_{f1} \geq 0,8 \cdot d$$

$$11,5mm \geq 0,8 \cdot 20mm = 16mm \Rightarrow$$

$$t_{pl3} + t_{f1} \geq 0,8 \cdot d$$

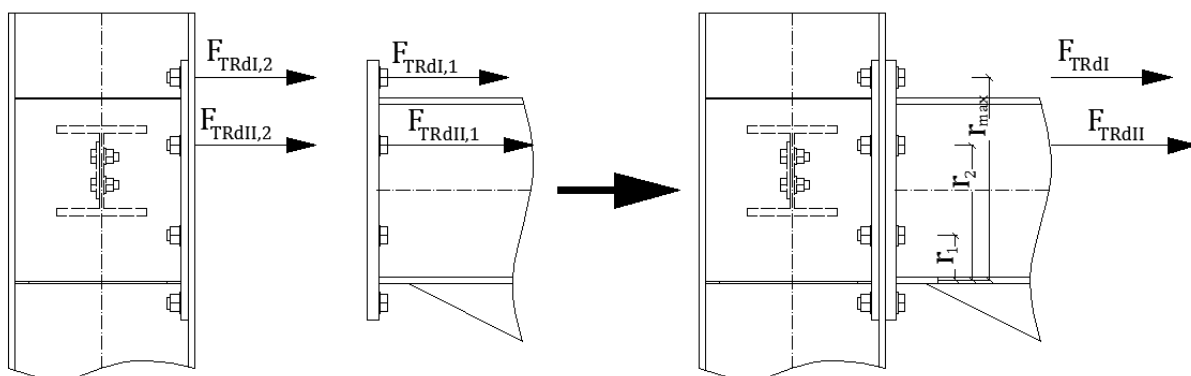
$$t_{pl3} \geq 0,8 \cdot d - t_{f1} = 0,8 \cdot 20mm - 11,5mm = 4,5mm$$

Izberemo debelino ojačitvene pločevine pasnice:  $t_{pl3} = 12mm$  (glej Slika 20)

### Račun nosilnosti posameznih vrst vijakov z nadomestnimi T elementi

Kot se kasneje izkaže, moramo umestiti ojačitve tlačne/natezne cone. Zato obravnavamo ojačano pasnico stebra. Najprej določimo nosilnost vrste vijakov 1, tj.  $F_{TRdI}$ , in nato še nosilnost vrste 2, tj.

$F_{TRdII}$ .



Slika 49: Prikaz nosilnosti posameznih vrst vijakov.

Pri nosilnosti vrste 1 obravnavamo:

- Nosilnost vrste vijakov nad natezno pasnico prečke v čelni pločevini  $F_{TRdI,1}$

$$m_x = \frac{h_{pl} - h_2 - 2 \cdot e_1 - 2 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_4}{2} = \frac{460 - 330 - 2 \cdot 30 - 2 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 4}{2} = 30,5 \text{ mm}$$

$$e_x = e_1 = 30 \text{ mm}$$

$$w = p_2 = 100 \text{ mm}$$

$$e = 30 \text{ mm}$$

$$n = 30 \text{ mm} \leq 1,25 \cdot m_x$$

$$l_{eff,cp} = \min \begin{cases} 2 \cdot \pi \cdot m_x = 2 \cdot \pi \cdot 30,5 \text{ mm} = 191,6 \text{ mm} \\ \pi \cdot m_x + w = (\pi \cdot 30,5 + 100) \text{ mm} = 195,8 \text{ mm} \\ \pi \cdot m_x + 2 \cdot e = (\pi \cdot 30,5 + 2 \cdot 30) \text{ mm} = 155,8 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{eff,cp} = 155,8 \text{ mm}$$

$$l_{eff,nc} = \min \begin{cases} 4 \cdot m_x + 1,25 \cdot e_x = (4 \cdot 30,5 + 1,25 \cdot 30) \text{ mm} = 159,5 \text{ mm} \\ e + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x = (30 + 2 \cdot 30,5 + 0,625 \cdot 30) \text{ mm} = 109,8 \text{ mm} \\ 0,5 \cdot b_p = 0,5 \cdot 160 \text{ mm} = 80 \text{ mm} \\ 0,5 \cdot w + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x = (0,5 \cdot 100 + 2 \cdot 30,5 + 0,625 \cdot 30) \text{ mm} = 129,8 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{eff} = l_{eff,nc} = 80 \text{ mm} \leq l_{eff,cp}$$

$$M_{pl} = \frac{l_{eff} \cdot t_{pl}^2}{4} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{8,0 \text{ cm} \cdot (2,0 \text{ cm})^2}{4} \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\gamma_{M0}} = 188 \text{ kNcm}$$

$$F_{TRd,1} = \frac{4 \cdot M_{pl}}{m_x} = \frac{4 \cdot 188 \text{ kNcm}}{3,05 \text{ cm}} = 246,6 \text{ kN}$$

$$F_{TRd,2} = \frac{2 \cdot M_{pl} + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m_x + n} = \frac{2 \cdot 188 \text{ kNcm} + 3,0 \text{ cm} \cdot 352,8 \text{ kN}}{3,05 \text{ cm}} = 237,1 \text{ kN}$$

$$F_{TRd,3} = \sum B_{t,Rd} = 352,8 \text{ kN}$$

$$F_{TRd,1} = \min(F_{TRd,1}, F_{TRd,2}, F_{TRd,3}) = 237,1 \text{ kN}$$

- Nosilnost vrste vijakov ob ojačitvi v ojačani pasnici stebra  $F_{TRd,2}$  (nad ojačitvijo)

$$m = \frac{p_2 - t_{w1} - 2 \cdot 0,8 \cdot r_1}{2} = \frac{100 - 7,5 - 2 \cdot 0,8 \cdot 18}{2} \text{ mm} = 31,9 \text{ mm}$$

$$m_2 = \frac{2 \cdot p_{11} + p_{12} - h_2 - 2 \cdot 0,8 \cdot a_3}{2} = \frac{2 \cdot 120 + 160 - 330 - 2 \cdot 0,8 \cdot 3}{2} \text{ mm} = 65,2 \text{ mm}$$

$$e = \frac{b_{pl} - p_2}{2} = \frac{160 - 100}{2} \text{ mm} = 30 \text{ mm}$$

$$n = e_2 = 30 \text{ mm} \leq 1,25 \cdot m$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{m}{m+n} = \frac{31,9}{31,9+30} = 0,52 \\ \lambda_2 &= \frac{m_2}{m+n} = \frac{65,2}{31,9+30} = 1,05 \end{aligned} \right\} \alpha = 5,25$$

$$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m = 2 \cdot \pi \cdot 31,9 \text{ mm} = 200,1 \text{ mm}$$

$$l_{eff,nc} = \alpha \cdot m = 5,25 \cdot 31,9 \text{ mm} = 167,5 \text{ mm}$$

$$l_{eff} = l_{eff,nc} = 167,5 \text{ mm} \leq l_{eff,cp}$$

$$M_{pl,1} = \frac{l_{eff} \cdot t_{f1}^2}{4} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{16,8 \text{ cm} \cdot (1,15 \text{ cm})^2}{4} \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\gamma_{M0}} = 130,1 \text{ kNcm}$$

$$M_{pl,2} = \frac{l_{eff} \cdot t_{f3}^2}{4} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{16,8 \text{ cm} \cdot (1,2 \text{ cm})^2}{4} \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,0} = 141,7 \text{ kNcm}$$

$$F_{TRd,1} = \frac{4 \cdot M_{pl,1} + 2 \cdot M_{pl,2}}{m} = \frac{4 \cdot 130,1 \text{ kNcm} + 2 \cdot 141,7 \text{ kNcm}}{3,19 \text{ cm}} = 252,0 \text{ kN}$$

$$F_{TRd,2} = \frac{2 \cdot M_{pl,2} + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m+n} = \frac{2 \cdot 130,1 \text{ kNcm} + 3,0 \text{ cm} \cdot 352,8 \text{ kN}}{3,19 \text{ cm} + 3,0 \text{ cm}} = 213,0 \text{ kN}$$

$$F_{TRd,3} = 352,8 \text{ kN}$$

$$F_{TRd,2} = \min(F_{trd,1}, F_{trd,2}, F_{trd,3}) = 213,0 \text{ kN}$$

Nosilnost Vrste 1 določimo kot  $F_{rdI} = \min(F_{trd,1}, F_{trd,2}) = 213,0 \text{ kN}$

Pri nosilnosti Vrste 2 obravnavamo:

- Nosilnost vrste vijakov pod natezno pasnico v čelni pločevini  $F_{rdII,1}$

$$e = e_2 = 30 \text{ mm}$$

$$m = \frac{p_2 - t_{w2} - 2 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_3}{2} = \frac{100 - 7,5 - 2 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 3}{2} \text{ mm} = 42,9 \text{ mm}$$

$$m_2 = \frac{h_2 - 2 \cdot t_{f2} - p_{12} - 2 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_2}{2} = \frac{330 - 2 \cdot 11,5 - 160 - 2 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 4}{2} \text{ mm} = 69,0 \text{ mm}$$

$$n = e_2 = 30 \text{ mm} \leq 1,25 \cdot m$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{m}{m+n} = \frac{42,9}{42,9+30} = 0,59 \\ \lambda_2 &= \frac{m_2}{m+n} = \frac{69,0}{42,9+30} = 0,95 \end{aligned} \right\} \alpha = 4,9$$



$$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m = 2 \cdot \pi \cdot 42,9mm = 269,5mm$$

$$l_{eff,nc} = \alpha \cdot m = 4,9 \cdot 42,9mm = 210,2mm$$

$$l_{eff} = l_{eff,nc} = 210,2mm \leq l_{eff,cp}$$

$$M_{pl} = \frac{21,0cm \cdot (2,0cm)^2}{4} \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{\gamma_{M0}} = 493,5kNcm$$

$$F_{TRd,1} = \frac{4 \cdot M_{pl}}{m} = \frac{4 \cdot 493,5kNcm}{4,29cm} = 460,1kN$$

$$F_{TRd,2} = \frac{2 \cdot M_{pl} + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 \cdot 493,5kNcm + 3,0cm \cdot 352,8kN}{(4,29 + 3)cm} = 280,6kN$$

$$F_{TRd,3} = \sum B_{t,Rd} = 352,8kN$$

$$F_{TRdII,1} = \min(F_{trd,1}, F_{trd,2}, F_{trd,3}) = 280,6kN$$

- Nosilnost vrste vijakov ob ojačitvi v ojačani pasnici stebra  $F_{TRdII,2}$  (pod ojačitvijo)

$$m = \frac{p_2 - t_{w1} - 2 \cdot 0,8 \cdot r_1}{2} = \frac{100 - 7,5 - 2 \cdot 0,8 \cdot 18}{2} mm = 31,9mm$$

$$m_2 = \frac{h_2 - p_{12} - 2 \cdot t_{pot} - 2 \cdot 0,8 \cdot a_3}{2} = \frac{330 - 160 - 2 \cdot 4 - 2 \cdot 0,8 \cdot 3}{2} mm = 78,6mm$$

$$e = \frac{b_{pl} - p_2}{2} = \frac{160 - 100}{2} mm = 30mm$$

$$n = e_2 = 30mm \leq 1,25 \cdot m$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{m}{m+n} = \frac{31,9}{31,9+30} = 0,52 \\ \lambda_2 &= \frac{m_2}{m+n} = \frac{78,6}{31,9+30} = 1,27 \end{aligned} \right\} \alpha = 5,3$$

$$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m = 2 \cdot \pi \cdot 31,9mm = 200,1mm$$

$$l_{eff,nc} = \alpha \cdot m = 5,3 \cdot 31,9mm = 169,1mm$$

$$l_{eff} = l_{eff,nc} = 169,1mm \leq l_{eff,cp}$$

$$M_{pl,1} = \frac{l_{eff} \cdot t_{f1}^2}{4} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{16,9cm \cdot (1,15cm)^2}{4} \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{\gamma_{M0}} = 131,4kNcm$$

$$M_{pl,2} = \frac{l_{eff} \cdot t_{pl,3}^2}{4} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{16,9cm \cdot (1,2cm)^2}{4} \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,0} = 143,0kNcm$$

$$F_{TRd,1} = \frac{4 \cdot M_{pl,1} + 2 \cdot M_{pl,2}}{m} = \frac{4 \cdot 131,4kNcm + 2 \cdot 143,0kNcm}{3,19cm} = 254,4kN$$

$$F_{TRd,2} = \frac{2 \cdot M_{pl,2} + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m+n} = \frac{2 \cdot 131,4kNcm + 3,0cm \cdot 352,8kN}{3,19cm + 3,0cm} = 213,4kN$$

$$F_{TRd,3} = 352,8kN$$

$$F_{TRd,2} = \min(F_{trd,1}, F_{trd,2}, F_{trd,3}) = 213,4kN$$

Nosilnost Vrste 2 določimo kot  $F_{trdII} = \min(F_{trdII,1}; F_{trdII,2}) = \min(280,6kN; 213,4kN) = 213,4kN$

Mejno nosilnost spoja določimo z izrazom:

$$M_{Rd} = r_2 \cdot F_{TRdII} + r_{max} \cdot F_{TRdI}$$

$$M_{Rd} = 0,239m \cdot 213,4kN + 0,359m \cdot 213,0kN$$

$$M_{Rd} = 127,5kNm > M_{Eds} = 106,1kNm$$

Vidimo, da je mejna upogibna nosilnost spoja večja od obremenitve.

Kontrola stojine stebra na strig

$$F_{TRd} = F_{TRdI} + F_{TRdII} = (213,0 + 213,4)kN = 426,4kN$$

$$V_d = \max(F_m; F_{TRd}) = \max(373,4kN; 426,4kN) = 426,4kN$$

$$V_d \leq V_{pl,Rd} = \eta_w \cdot d_1 \cdot t_{w1} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 1,2 \cdot 27,1cm \cdot 0,75cm \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,0 \cdot \sqrt{3}} = 330,9kN$$

$$t_{oj} \geq \frac{\sqrt{3} \cdot V_d \cdot \gamma_{M0}}{\eta_w \cdot d_1 \cdot f_y} - t_{w1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 426,4kN \cdot 1,0}{1,2 \cdot 27,1cm \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}} - 0,75cm = 0,22cm$$

Izberemo ojačitveni panel debeline  $t_{oj} = 8mm$ . Širina panela je enaka  $b_{oj} = d_1 = 271mm$  in višina

$h_{oj} \geq h_2 + b_s = (330 + 210,3)mm = 550mm$ . Višino določimo, tako da s panelom presežemo vplivno območje tlačne/natezne cone spoja (glej kontrolo tlačne/natezne cone).

Kontrola tlačne/natezne cone v stojini stebra

$$b_s = t_{f1} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_2 + 2 \cdot t_{pl} + 5 \cdot (t_{f1} + r_1) = (11,5 + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 4 + 2 \cdot 20 + 5 \cdot (11,5 + 18)) \text{ mm}$$

$$b_s = 210,3 \text{ mm}$$

$$N_d = \max(F_m, F_{TRd}) - b_s \cdot t_{w1} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 413,4 \text{ kN} - 21,0 \text{ cm} \cdot 0,75 \text{ cm} \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,0} = 43,3 \text{ kN}$$

Potrebujemo ojačitev v obliki reber. Ker mora biti spoj simetričen glede na horizontalno os, umestimo tako v tlačno kot tudi natezno cono po dve enaki rebri. Rebra oblikujemo, tako da zadostimo naslednjim pogojem  $N_d \leq 2 \cdot b_{pot} \cdot t_{pot} \cdot f_y / \gamma_{M0}$  in  $b_{pot} \leq 14 \cdot \varepsilon \cdot t_{pot}$ , kjer je  $b_{pot}$  širina rebra in  $t_{pot}$  debelina rebra.

$$t_{pot} = \sqrt{\frac{N_d \cdot \gamma_{M0}}{2 \cdot 14 \cdot \varepsilon \cdot f_y}} = \sqrt{\frac{43,3 \text{ kN} \cdot 1,0}{2 \cdot 14 \cdot 1,0 \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}} = 0,26 \text{ cm}$$

Izberemo debelino rebra  $t_{pot} = 4 \text{ mm}$  in širino  $b_{pot} = 14 \cdot 1,0 \cdot 4 \text{ mm} = 56 \text{ mm}$ .

Dolžina rebra je enaka  $l_{pot} = h_1 - 2 \cdot t_{f1} = (330 - 2 \cdot 11,5) \text{ mm} = 307 \text{ mm}$ .

### 7.3.1.1 Kontrola robustnosti spoja

Pri zagotavljanju robustnosti konstrukcije preverjamo, ali spoj prenese potrebno natezno silo. Minimalna znaša 75 kN, vendar je odvisna od kategorije objekta. V tem poglavju bomo preverili, kolikšna je največja natezna sila, ki jo spoj še prenese. Kontrolirali smo bruto prerez prečke, zware med čelno pločevino in prečko, preboj čelne pločevine, nosilnost vrst vijakov s T elementi in nosilnost stojine stebra v nategu. Kontrole sledijo prenosu obtežbe v spoju.

Natezna nosilnost prečke

$$F_1 = N_{pl.Rd} = \frac{A_2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{62,6 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,0} = 1471,1 \text{ kN}$$

Nosilnost zvarov med čelno pločevino in prečko

Pasnica prečke je privarjena z zvari  $a_4 = 4 \text{ mm}$ , stojina pa z  $a_3 = 3 \text{ mm}$ .

$$F_2 = f_{vw,d} \cdot A_w$$

$$A_w = 2 \cdot a_4 \cdot (2 \cdot b_2 - t_w - 2 \cdot r_1) + 2 \cdot a_3 \cdot d_2$$

$$A_w = (2 \cdot 0,4 \cdot (2 \cdot 16 - 0,75 - 2 \cdot 1,8) + 2 \cdot 0,3 \cdot 27,1) \text{ cm}^2$$

$$A_w = 38,4 \text{ cm}^2$$

$$F_2 = 20,8 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 38,4 \text{ cm}^2 = 798,3 \text{ kN}$$

Preboj pločevine

$$F_3 = 8 \cdot B_{p,Rd} = 8 \cdot \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 3,106 \text{ cm} \cdot 1,65 \text{ cm} \cdot 36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} = 2225,7 \text{ kN}$$

Nosilnost natezne cone določena z nadomestnimi T-elementi

$$F_4 = 2 \cdot (F_{TRdI} + F_{TRdII}) = 2 \cdot (201,0 + 212,4) \text{ kN} = 826,8 \text{ kN}$$

Natezna cona v stojini stebra

Upoštevamo samo efektivni prerez ojačitvenega panela na stojini stebra, ki znaša

$$t_{eff} = t_{w1} + t_{oj} = (7,5 + 4) \text{ mm} = 11,5 \text{ mm} < 1,5 \cdot t_{w1} = 1,5 \cdot 7,5 \text{ mm} = 11,3 \text{ mm}.$$

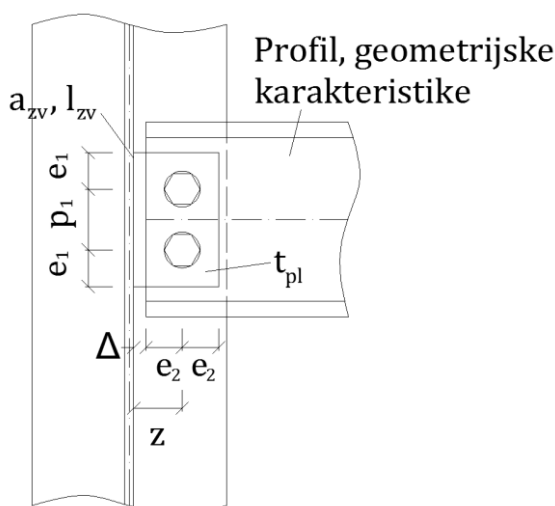
$$F_5 = 2 \cdot b_s \cdot t_{eff} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 2 \cdot 21,0 \text{ cm} \cdot 1,13 \text{ cm} \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,0} = 1115,3 \text{ kN}$$

Največja natezna sila, ki bi jo spoj še prenesel

$$F_{Rd} = \min(F_1, F_2, F_3, F_4, F_5) = 798,3 \text{ kN}$$

### 7.3.2 Členkast spoj z vezno pločevino

Izvedli smo členkast spoj z vezno pločevino. Uporabili smo jeklo S235, dva vijaka M16 8`8 in prerez prečke HEB 160. Obremenitev v spoju znaša  $V_{Ed} = 18,8 \text{ kN}$ .



Slika 50: Prikaz karakteristik členkastega spoja

Kontrola bruto prereza

$$V_{Ed} \leq \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$A_v = (54,3 - 2 \cdot 16 \cdot 1,3 + (0,8 + 2 \cdot 1,5) \cdot 1,3) \text{ cm}^2 = 17,64 \text{ cm}^2$$

$$V_{Ed} \leq \frac{17,64 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 239,3 \text{ kN}$$

Strižna nosilnost vijakov

$$V_{Ed} \leq V_{v,Rd} = \frac{m \cdot F_{v,Rd}}{\sqrt{(1 + \alpha \cdot m)^2 + (\beta \cdot m)^2}}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 80 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 2,45 \text{ cm}^2}{1,25} = 94,1 \text{ kN}$$

Koda programa je zapisana, tako da v tej kontroli izberemo potrebno število vijakov. Začnemo pri številu vijakov 1, kjer je število vrstic vijakov  $n_b$  enako številu stolpcev  $n_w$  in je  $n_b = n_w = 1$ .

$$\alpha = 0$$

$$d_0 = d + 2 \text{ mm} = (16 + 2) \text{ mm} = 18 \text{ mm}$$

$$z = \Delta + 1,5 \cdot d_0 + (n_w - 1) \cdot \frac{3 \cdot d_0}{2} = (10 + 1,5 \cdot 18 + 0) \text{ mm} = 37 \text{ mm}$$

$$\beta = \frac{6 \cdot z}{n_b \cdot (n_b + 1) \cdot 3 \cdot d_0} = \frac{6 \cdot 37 \text{ mm}}{1 \cdot (1 + 1) \cdot 3 \cdot 18 \text{ mm}} = 2,05$$

$z$  je horizontalna razdalja od pasnice stebra do središča vijakov.

$$V_{Ed} \leq V_{v,Rd} = \frac{1 \cdot 94,1 \text{ kN}}{\sqrt{(1+0)^2 + (2,05 \cdot 1)^2}} = 41,2 \text{ kN}$$

Razporeditev vijakov

$$t = \min(t_w, t_{pl}) = \min(8, 6) \text{ mm} = 6 \text{ mm}$$

$$2,2 \cdot d_0 = 2,2 \cdot 18 \text{ mm} \leq p_1 \leq \min(14 \cdot t, 200) = \min(14 \cdot 6 \text{ mm}, 200)$$

$$39,6 \text{ mm} \leq p_1 = 50 \text{ mm} \leq 84 \text{ mm}$$

$$1,2 \cdot d_0 = 1,2 \cdot 18 \text{ mm} \leq e_1 \leq \max(8 \cdot t, 125) = \min(8 \cdot 6 \text{ mm}, 125)$$

$$21,6 \text{ mm} \leq e_1 = 30 \text{ mm} \leq 125 \text{ mm}$$

$$2,4 \cdot d_0 = 2,4 \cdot 18 \text{ mm} \leq p_2 \leq \min(14 \cdot t, 200) = \min(14 \cdot 6 \text{ mm}, 200)$$

$$43,2 \text{ mm} \leq p_2 = 40 \text{ mm} \leq 84 \text{ mm}$$

Izberemo večjo horizontalno razdaljo med vijaki:  $p_2 = 44 \text{ mm}$ .

$$1,2 \cdot d_0 = 1,2 \cdot 18 \text{ mm} \leq e_2 \leq \max(8 \cdot t, 125) = \min(8 \cdot 6 \text{ mm}, 125)$$

$$21,6 \text{ mm} \leq e_2 = 30 \text{ mm} \leq 125 \text{ mm}$$

Kontrola neto prereza profila

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd,net} = \frac{A_{v,net} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{(A_v - n_b \cdot d_0 \cdot t_w) \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{(17,64 - 1 \cdot 1,8 \cdot 0,8) \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3} \cdot 1,0}$$

$$V_{Ed} \leq 219,8 \text{ kN}$$

Kontrola bočnih pritiskov

Ker imamo samo eno stolpec vijakov, tj.  $n_w = 1$ , ne upoštevamo izrazov, ki vsebujejo  $p_2$ .

$$V_{Ed} \leq V_{b,Rd} = \frac{m \cdot F_{b,Rd}}{\sqrt{(1 + \alpha \cdot m)^2 + (\beta \cdot m)^2}}$$

$$k_1 = \min \left( 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5; 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5 \right) = \min \left( 2,8 \cdot \frac{30}{18} - 1,7 \leq 2,5; / \right) = \min (2,5; /) = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{30mm}{3 \cdot 18mm} = 0,56 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{50mm}{3 \cdot 18mm} - \frac{1}{4} = 0,68 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800 \frac{kN}{cm^2}}{360 \frac{kN}{cm^2}} = 2,22 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 0,56$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,56 \cdot 36 \frac{kN}{cm^2} \cdot 1,6cm \cdot 0,6cm}{1,25} = 38,7kN$$

$$z = \Delta + e_2 + \frac{(n_w - 1) \cdot p_2}{2} = 10mm + 30mm + 0 = 40mm$$

$$\alpha = 0$$

$$\beta = \frac{6 \cdot z}{n_b \cdot (n_b + 1) \cdot p_1} = \frac{6 \cdot 40mm}{1 \cdot (1 + 1) \cdot 50mm} = 2,4$$

$$V_{Ed} \leq V_{b,Rd} = \frac{1 \cdot 38,7kN}{\sqrt{(1 + 0)^2 + (2,4 \cdot 1)^2}} = 14,9kN$$

Kontrola se ne izide. Zato povečamo število vijakov na 2, tako da je  $m = 1$ ,  $n_w = 1$  in  $n_b = 2$ . Ob tem moramo preveriti, če je razporeditev vijakov ustrezna, tj. da razdalja od sredine vijaka do pasnice prečke znaša vsaj  $2 \cdot t_w$ . Tako zmanjšamo razdaljo na  $e_1 = 26mm$ . Ob tem zmanjšamo še horizontalno razdaljo  $e_2 = 26mm$ .

$$p_1 + 2 \cdot e_1 = (50 + 2 \cdot 26)mm = 102mm \leq h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot 2 \cdot t_w = (160 - 2 \cdot 13 - 2 \cdot 2 \cdot 8)mm = 102mm$$

$$k_1 = \min \left( 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5; 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5 \right) = \min \left( 2,8 \cdot \frac{26}{18} - 1,7 \leq 2,5; / \right) = \min (2,5; /) = 2,34$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{26 \text{ mm}}{3 \cdot 18 \text{ mm}} = 0,48 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{50 \text{ mm}}{3 \cdot 18 \text{ mm}} - \frac{1}{4} = 0,68 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{360 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 2,22 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 0,56$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,34 \cdot 0,48 \cdot 36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 1,6 \text{ cm} \cdot 0,6 \text{ cm}}{1,25} = 31,2 \text{ kN}$$

$$z = \Delta + e_2 + \frac{(n_w - 1) \cdot p_2}{2} = 10 \text{ mm} + 26 \text{ mm} + 0 = 36 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0$$

$$\beta = \frac{6 \cdot z}{n_b \cdot (n_b + 1) \cdot p_1} = \frac{6 \cdot 36 \text{ mm}}{2 \cdot (2 + 1) \cdot 50 \text{ mm}} = 0,72$$

$$V_{Ed} \leq V_{b,Rd} = \frac{2 \cdot 31,2 \text{ kN}}{\sqrt{(1+0)^2 + (0,72 \cdot 1)^2}} = 50,6 \text{ kN}$$

Duktilnost v členkastem spoju z vezno pločevino zagotovimo s tem, da je nosilnost na strig večja od nosilnosti na bočni pritisk.

$$V_{v,Rd} = \frac{2 \cdot 94,1 \text{ kN}}{\sqrt{(1+0)^2 + (0,72 \cdot 1)^2}} = 152,7 \text{ kN} \geq V_{b,Rd} = 50,6 \text{ kN}$$

Kontrola strižnega iztrga vezne pločevine

$$V_{Ed} \leq V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot A_{nt} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$A_{nt} = (e_2 - 0,5 \cdot d_0) \cdot t = (2,6 - 0,5 \cdot 1,8) \cdot 0,6 \text{ cm}^2 = 1,02 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} = (p_1 + e_1 - 1,5 \cdot d_0) \cdot t = (5,0 + 2,6 - 1,5 \cdot 1,8) \cdot 0,6 \text{ cm}^2 = 2,94 \text{ cm}^2$$



$$V_{Ed} \leq V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot 1,02 \text{ cm}^2 \cdot \frac{36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} + 2,94 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 53,7 \text{ kN}$$

Kontrola strižnega iztrga profila

$$V_{Ed} \leq V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot A_{nt} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$h_v = 2 \cdot e_1 + p_1 = (2 \cdot 26 + 50) \text{ mm} = 102 \text{ mm}$$

$$A_{nt} = (e_2 - 0,5 \cdot d_0) \cdot t = (2,6 - 0,5 \cdot 1,8) \cdot 0,6 \text{ cm}^2 = 1,02 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} = \left( \frac{h - h_v}{2} + p_1 + e_1 - 1,5 \cdot d_0 \right) \cdot t = \left( \frac{16 - 10,2}{2} + 5,0 + 2,6 - 1,5 \cdot 1,8 \right) \cdot 0,6 \text{ cm}^2 = 7,92 \text{ cm}^2$$

$$V_{Ed} \leq V_{eff,2,Rd} = 0,5 \cdot 1,02 \text{ cm}^2 \cdot \frac{36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} + 7,92 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 119,9 \text{ kN}$$

Nosilnost vezne pločevine

- Upogibna nosilnost

$$e = 36 \text{ mm} > \frac{t_{pl}}{0,15} = 40 \text{ mm} \Rightarrow \text{kratka vezna pločevina}$$

$$V_{Ed} \cdot e \leq h_v^2 \cdot \frac{t_{pl} \cdot f_y}{6 \cdot \gamma_{M0}}$$

$$18,79 \text{ kN} \cdot 3,6 \text{ cm} = 67,6 \text{ cm} \leq (10,2 \text{ cm})^2 \cdot \frac{0,6 \text{ cm} \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{6 \cdot 1,0} = 244,5 \text{ kNcm}$$

- Nosilnost na strig

$$V_{Ed} \leq h_v \cdot t_{pl} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 10,2 \text{ cm} \cdot 0,6 \text{ cm} \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 83,0 \text{ kN}$$

Kontrola zvarov med vozliščno pločevino in pasnico stebra

$$a_{zv} = 3mm$$

$$l_{zv} = h_v = 102mm$$

$$l_{eff} = l_{zv} - 2 \cdot 2 \cdot a_{zv} = (102 - 2 \cdot 2 \cdot 3)mm = 90mm$$

$$3mm \leq a_{zv} = 3mm \leq 0,7 \cdot t = 0,7 \cdot 6mm = 4,2mm$$

$$\max(30; 6 \cdot a_{zv}) = \max(30; 6 \cdot 3)mm \leq l_{eff} \leq 150 \cdot a_{zv} = 150 \cdot 3mm$$

$$30mm \leq l_{eff} = 90mm \leq 450mm$$

$$\sqrt{v_{II}^2 + n^2} \leq f_{v,w,d}$$

$$\sqrt{\left(\frac{V_{Ed}}{2 \cdot l_{eff} \cdot a_{zv}}\right)^2 + \left(\frac{3 \cdot z \cdot V_{Ed}}{l_{eff}^2 \cdot a_{zv}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{18,8kN}{2 \cdot 9,0cm \cdot 0,3cm}\right)^2 + \left(\frac{3 \cdot 3,6cm \cdot 18,8kN}{(9,0cm)^2 \cdot 0,3cm}\right)^2} \leq f_{v,w,d} = 20,8 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sqrt{\left(3,48 \frac{kN}{cm^2}\right)^2 + \left(8,35 \frac{kN}{cm^2}\right)^2} = 9,0 \frac{kN}{cm^2} \leq f_{v,w,d} = 20,8 \frac{kN}{cm^2}$$

### 7.3.3 Priključek nateznega elementa

Za premoščanje razpona 10 metrov smo izbrali nosilec z nateznim pasom. Tako smo zmanjšali upogibno obremenitev v zgornji prečki. V tem poglavju prikazujemo dimenzioniranje priključitve elementa nateznega pasu na prečko (glej Slika 41). Za spodnji natezni pas smo uporabili profile U120. Ker knjižnica profilov v Tekli ni povsem kompatibilna s knjižnico profilov v makrojih, smo v računu uporabili profil UB 127x76x13. Geometrijske karakteristike slednjega so:  $h = 127 mm$ ,  $b = 67 mm$ ,  $t_w = 4 mm$ ,  $t_f = 7,6 mm$ ,  $r = 7,6 mm$ ,  $A = 16,52 cm^2$  in  $d = 96,6 mm$ . Obremenitev v spoju znaša  $N_{Ed} = 145,3kN$ . Uporabili smo jeklo S325 in šest vijakov M16 8·8. Karakteristike spoja so prikazane na Slika 41.

Kontrolo na strig – uporabimo, da določimo prvi približek potrebnega števila vijakov

$$N_{Ed} \leq m \cdot F_{v,Rd} \Rightarrow m \geq \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M2}}{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}$$

$$m \geq \frac{145,3kN \cdot 1,25}{0,6 \cdot 80 \frac{kN}{cm^2} \cdot 1,57cm^2} = 2,41$$

Izberemo  $m = 3$ .

Razporeditev vijakov

$$t = \min(t_w, t_{pl}) = \min(4, 6)mm = 4mm$$

$$1,2 \cdot d_0 = 1,2 \cdot 18\text{mm} \leq e_1 \leq \max(8 \cdot t, 125) = \min(8 \cdot 4\text{mm}, 125)$$

$$21,6\text{mm} \leq e_1 = 31\text{mm} \leq 125\text{mm}$$

$$2,4 \cdot d_0 = 2,4 \cdot 18\text{mm} \leq p_2 \leq \min(14 \cdot t, 200) = \min(14 \cdot 4\text{mm}, 200)$$

$$43,2\text{mm} \leq p_2 = 54\text{mm} \leq 56\text{mm}$$

$$1,2 \cdot d_0 = 1,2 \cdot 18\text{mm} \leq e_2 \leq \max(8 \cdot t, 125) = \min(8 \cdot 4\text{mm}, 125)$$

$$21,6\text{mm} \leq e_2 = 63,5\text{mm} \leq 125\text{mm}$$

Kontrola neto prereza profila – redukcijski faktor  $\beta$  določimo z interpolacijo v skladu s preglednico 3.8 v [1]. Površino neto prereza določimo, tako da prerez U-profila razdelimo na dva kontika, ki po navadi nista enakokraka. Za neto površino prereza upoštevamo površino dveh enakokrakih kotnikov, katerih kraki so enaki manjšima od preostalih dveh, zmanjšano za površino lukenj.

$$N_{Ed} \leq N_{u,Rd} = \frac{\beta \cdot A_{neto} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$A_{neto} = A - d_0 \cdot t_w - 2 \cdot \left(b - \frac{h}{2}\right) \cdot t_f = \left(16,52 - 1,8 \cdot 0,4 - 2 \cdot \left(6,7 - \frac{12,7}{2}\right) \cdot 0,76\right) \text{cm}^2 = 14,62\text{cm}^2$$

$$2,5 \cdot d_0 = 45\text{mm} < p_1 = 55\text{mm} < 5 \cdot d_0 = 90\text{mm}$$

$$\beta = 0,5 + 0,2 \cdot \frac{p_1 - 2,5 \cdot d_0}{2,5 \cdot d_0} = 0,5 + 0,2 \cdot \frac{55 - 45}{45} = 0,54$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,54 \cdot 14,62\text{cm}^2 \cdot 36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} = 227,4\text{kN}$$

Kontrola bočnih pritiskov

$$N_{Ed} \leq m \cdot F_{b,Rd}$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{31\text{mm}}{3 \cdot 18\text{mm}} = 0,57 \\ \frac{55\text{mm}}{3 \cdot 18\text{mm}} - \frac{1}{4} = 1,01 \\ \frac{800 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{360 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 2,22 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 0,57$$

$$k_1 = \min \left( 2,8 \cdot \frac{63,8}{18} - 1,7 \leq 2,5; / \right) = \min (2,5; /) = 2,5$$

$$N_{Ed} \leq m \cdot F_{b,Rd} = 3 \cdot \frac{2,5 \cdot 0,57 \cdot 36 \frac{kN}{cm^2} \cdot 1,6cm \cdot 0,4cm}{1,25} = 79,4kN$$

Kontrola se ne izide, zato izberemo  $m = 6$ . Robna razdalja je sedaj  $e_2 = 36,5mm$ .

$$k_1 = \min \left( 2,8 \cdot \frac{36,5}{18} - 1,7 \leq 2,5; 1,4 \cdot \frac{54}{18} - 1,7 \leq 2,5 \right) = \min (2,5; 2,5) = 2,5$$

$$N_{Ed} \leq m \cdot F_{b,Rd} = 6 \cdot \frac{2,5 \cdot 0,57 \cdot 36 \frac{kN}{cm^2} \cdot 1,6cm \cdot 0,4cm}{1,25} = 157,6kN$$

Kontrola strižnega iztrga profila

$$N_{Ed} \leq V_{eff,1,Rd} = A_{nt} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$A_{nt} = (p_2 - d_0) \cdot t = (5,4 - 1,8) \cdot 0,4cm^2 = 1,44cm^2$$

$$A_{nv} = 2 \cdot (e_1 + 2 \cdot p_1 - 2,5 \cdot d_0) \cdot t = 2 \cdot (3,1 + 2 \cdot 5,5 - 2,5 \cdot 1,8) \cdot 0,4cm^2 = 7,68cm^2$$

$$N_{Ed} \leq 1,44cm^2 \cdot \frac{36 \frac{kN}{cm^2}}{1,25} + 7,68cm^2 \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 41,5kN + 104,2 = 145,7kN$$

Kontrola neto prereza vozliščne pločevine

$$N_{Ed} \leq \frac{0,9 \cdot A_{neto} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$A_{neto} = \left( 2 \cdot 2 \cdot p_1 \cdot tg \frac{\pi}{6} + p_2 - 2 \cdot d_0 \right) \cdot t_{pl} = \left( 2 \cdot 2 \cdot 5,5 \cdot tg \frac{\pi}{6} + 5,4 - 2 \cdot 1,8 \right) \cdot 0,6cm^2 = 8,7cm^2$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,9 \cdot 8,7cm^2 \cdot 36 \frac{kN}{cm^2}}{1,25} = 223,5kN$$

Kontrola zvarov med vozliščno pločevino in pasnico stebra

$$a_{zv} = 4mm$$

$$l_{zv} = h_{pl} = 391mm$$

$$l_{eff} = l_{zv} - 2 \cdot 2 \cdot a_{zv} = (391 - 2 \cdot 2 \cdot 4)mm = 367mm$$

$$3mm \leq a_{zv} = 4mm \leq 0,7 \cdot t = 0,7 \cdot 6mm = 4,2mm$$

$$\max(30; 6 \cdot a_{zv}) = \max(30; 6 \cdot 4)mm \leq l_{eff} \leq 150 \cdot a_{zv} = 150 \cdot 4mm$$

$$30mm \leq l_{eff} = 90mm \leq 600mm$$

$$\frac{N_{Ed}}{a_{zv} \cdot l_{eff}} = \frac{145,3kN}{0,4cm \cdot 36,7cm} = 9,9 \frac{kN}{cm^2} \leq 20,8 \frac{kN}{cm^2}$$

## 8 ZAKLJUČEK

V okviru diplomske naloge smo naredili makroje, ki avtomatizirajo dimenzioniranje momentnega spoja s čelno pločevino, členkastega spoja z vezno pločevino in priključka nateznega elementa na vezno pločevino. Makroje uporabljamo za izračun zgoraj omenjenih jeklenih spojev kot komponent v programu Tekla Structures. V datotekah Excel se izpišejo vhodni podatki in rezultati kontrole. Tako jih lahko uporabnik kritično preveri, preden spremembe vpiše v model spoja. V diplomski nalogi smo pojasnili teoretično ozadje kontrol, ki jih makroji izvajajo in smernice, katere naj bi upoštevali gradbeni inženirji pri dimenzioniranju spojev v smislu standardizacije. Pokazali smo uporabo makrojev na dejanskih primerih.

Uporabili smo znanje o jeklenih spojih in znanje o programiranju makrojev. Nekatere kontrole za dimenzioniranje spojev, ki smo jih spoznali pri pouku, smo še poglobili in spoznali dodatni vidik dimenzioniranja spojev. Tako smo npr. pri dimenzioniranju vijakov členkastega spoja upoštevali vpliv nominalnega momenta, ki se v spoju razvije. Polega tega smo pri prikazanih primerih upoštevali še dodatne obremenitve priključenih elementov, ki nastopijo kot posledica dejanskega oblikovanja in postavitve sistema spojev na konstrukciji.

Makroji lahko služijo kot dober začetek izdelave kompleksnega orodja za avtomatizacijo dimenzioniranja jeklenih spojev v povezavi z BIM modeliranjem. Povezava med BIM programom in Excelovo datoteko, ki bi izvozila vhodne podatke iz Tekle in jih uvozila zopet nazaj, bi močno povečala uporabnost takega orodja. Pri vzpostavljanju povezave so nastopile težave, saj smo imeli na voljo študentsko verzijo programa Tekla Structures. Pri momentnem spoju lahko z makrojem dimenzioniramo spoje s štirimi ali osmimi vijaki. Vendar so omejitve tudi na strani modelirnika BIM. Najbolj smo pogrešali možnost, da lahko v programu Tekla Structures pri komponenti priključka nateznega elementa modeliramo dodatno ojačitveno pločevino v stojini priključenega elementa, s katero povečamo nosilnost priključka, ne da bi povečevali prerez sekundarnega elementa ali število vijakov. Podobno koristna bi bila možnost, da lahko pri komponenti momentnega spoja ojačamo stojino stebra z dodatnim panelom, ki poveča nosilnost stojine v tlaku, nategu in strigu.

Narejeni makroji so primerni za enostavne spoje. Ekstremni spoji so tako prepuščeni posamezni analizi projektanta.

## VIRI

- [1] SIST EN 1993-1-8:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-8. del: Projektiranje spojev.
- [2] SIST EN 1993-1-1:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.
- [3] Arko, L. 2011. Projektiranje konstrukcij s parametričnim modelirnikom Tekla Structures. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Arko): 76 str.
- [4] The Steel Construction Institute, The British Constructional Steelwork Association Limited. 2011. Joints in Steel Construction, Simple joints to Eurocode 3. London. 466 str.
- [5] The Steel Construction Institute. 1995. Joints in Steel Construction, Moment connections. London. 239 str.
- [6] Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 3. Poglavje.
- [7] Cerovšek, T. 2010a. Konstruiranje s parametričnimi modelirniki BIM. V: Lopatič, J., Markelj, V. in Saje, F. (ur.). V: Zbornik 32. Zborovanje gradbenih konstrukterjev Slovenije, Bled, hotel Golf, 7. – 8. oktober 2010. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstrukterjev: str. 233 – 240.

### Ostali viri:

- [8] Excel Macros Tutorial. 2015.  
<https://blog.udemy.com/excel-macros-tutorial/> (Pridobljeno 21.04.2015)
- [9] VLOOKUP (funkcija VLOOKUP). 2015  
<https://support.office.com/sl-si/article/VLOOKUP-funkcija-VLOOKUP-0bbc8083-26fe-4963-8ab8-93a18ad188a1> (Pridobljeno 21.04.2015)
- [10] ArcelorMittal. 2015. Products and services.  
<http://sections.arcelormittal.com/products-services/products-ranges.html> (Pridobljeno 10.03.2015)